ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Научная статья

УДК 626.824:681.12

doi: 10.31774/2712-9357-2022-12-1-228-244

Оценка работоспособности испытываемого средства водоучета в диапазоне допустимой погрешности измерений

Александр Анатольевич Чураев¹, Александр Евгеньевич Шепелев²,
Любовь Васильевна Юченко³

^{1, 2, 3}Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск,
Российская Федерация

¹churaev75@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9198-169X>

²oamsrosniipm@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8739-8573>

³oamsrosniipm@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8372-0852>

Аннотация. Цель: определение в полевых условиях работоспособности разработанного средства водоучета в зависимости от различных условий и режимов работы открытого канала с получением требуемых параметров водного потока в диапазоне допустимой погрешности. **Материалы и методы.** Разработанное средство водоучета состоит из приборного оборудования и участка гидротехнического сооружения. В приборное оборудование входит датчик уровня (датчик гидростатического давления) и автономный блок дистанционного контроля, состоящий из контроллера-модема, аккумуляторной батареи, антенны GSM. Участок гидротехнического сооружения представляет собой укрепленный участок открытого канала, удовлетворяющего требованиям выполнения измерений расхода воды методом «скорость – площадь» при градуировке и поверке средств измерения. **Результаты.** На первом этапе испытаний в результате установления уровенно-расходной характеристики в контрольном створе русла канала было выведено уравнение $Q = f(h) = 0,4961h^2 + 1,7319h - 0,4687$ с относительной погрешностью 2,67 %, которое использовалось для дальнейшей тарировки средства водоучета. На втором этапе были проведены испытания приборного оборудования с установлением величины относительной погрешности измерений, которая составила 2,23 %. В итоге общая относительная погрешность измерения испытываемого средства водоучета составила 4,90 %, что не превышает 5 % и соответствует требованиям к аналогичным средствам измерения. **Выводы.** По результатам проведенных исследований разработан алгоритм оценки работоспособности и определения погрешности измерения для новых испытываемых средств водоучета, состоящих из приборного оборудования (включающего датчик уровня) и гидротехнического сооружения (открытого канала), отвечающего требованиям выполнения измерений расхода воды методом «скорость – площадь».

Ключевые слова: средство водоучета, открытый канал, датчик уровня, модем, градуировочная зависимость, контролируемый показатель, погрешность

Для цитирования: Чураев А. А., Шепелев А. Е., Юченко Л. В. Оценка работоспособности испытываемого средства водоучета в диапазоне допустимой погрешности измерений // Мелиорация и гидротехника. 2022. Т. 12, № 1. С. 228–244. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2022-12-1-228-244>.

HYDRAULIC ENGINEERING

Original article

Performance assessment of the monitored water metering device within the range of permissible measurement error

Alexandr A. Churaev¹, Alexandr E. Shepelev², Lyubov V. Yuchenko³

^{1, 2, 3}Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk, Russian Federation

¹churaev75@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9198-169X>

²oamsrosniipm@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8739-8573>

³oamsrosniipm@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8372-0852>

Abstract. Purpose: determination of the performance of the developed water metering device under the field conditions, depending on various conditions and operating modes of the open channel, to obtain the required parameters of the water flow in the range of permissible error. **Materials and methods.** The developed water metering device consists of instrumentation and a section of a hydraulic structure. The instrumentation includes a level sensor (hydrostatic pressure sensor) and an autonomous remote control unit, consisting of a modem controller, a battery, a GSM antenna. The section of a hydraulic structure is a fortified section of an open channel that meets the requirements for measuring water discharge using the “velocity – area” method when calibrating and verifying measuring instruments. **Results.** At the first stage of testing, as a result of determining the level-flow characteristic in the control section of the channel, the equation $Q = f(h) = 0.4961h^2 + 1.7319h - 0.4687$ with a relative error of 2.67 % was derived, which was used for further calibration of the water metering device. At the second stage, testing of instrumental equipment was carried out with the determining the value of the relative measurement error, which was 2.23 %. As a result, the total relative measurement error of the monitored water metering device was 4.90 %, which does not exceed 5% and meets the requirements for similar measuring instruments. **Conclusions.** Based on the results of the studies, an algorithm has been developed for assessing the performance and determining the measurement error for new tested water metering devices, consisting of instrumental equipment (including a level sensor) and a hydraulic structure (open channel) that meets the requirements for measuring water discharge by the “velocity – area” method.

Keywords: water metering device, open canal, level sensor, modem, calibration dependence, controlled indicator, error

For citation: 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 Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2022;12(1):228–244. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2022-12-1-228-244>.

Введение. Повышение эффективности использования водных ресурсов на мелиоративных системах неизбежно связано с обеспечением учета и контроля водного режима и водораспределения на сооружениях [1]. В 1980-х гг. в нашей стране с целью улучшения водоизмерения на мелиоративных системах гидротехнические сооружения, играющие роль водовыделов, оснащали насадками или приставками с установленными на них

водомерами, а сбросные сооружения – самописцами или уровнемерами. В дальнейшем организация технически надежного распределения и учета воды на водовыделах хозяйств и на севооборотных участках потребовала их оснащения водорегулирующими сооружениями и водомерными устройствами [2]. Появились новые разработки конструкций водомерных сооружений и устройств в виде первичных преобразователей, счетчиков стока, передатчиков уровней воды в каналах, гидрометрических вертушек для измерения скорости течения воды и др. [3–5]. В настоящее время все больше внимания уделяется усовершенствованию пунктов водоучета на мелиоративных системах. К их средствам учета воды предъявляются такие требования, как уменьшение погрешности измерения, повышение надежности конструкции, повышение оперативности передачи данных, несложность в эксплуатации и метрологическом обслуживании [6, 7].

Материалы и методы. В ФГБНУ «РосНИИПМ» проведены натурные испытания разработанного нового средства водоучета для водовыделов открытой сети. Цель испытаний – определение в полевых условиях работоспособности разработанного средства водоучета в зависимости от различных условий и режимов работы открытого канала с получением требуемых параметров водного потока в диапазоне допустимой погрешности измерения. Натурные испытания проводились по разработанной ранее программе испытаний, а также согласно действующим нормативно-методическим документам: ГОСТ 19.301¹, ГОСТ Р 52931², МИ 1759³.

¹ГОСТ 19.301-79. Единая система программной документации. Программа и методика испытаний. Требования к содержанию и оформлению. Введ. 1981-01-01. М.: Стандартиформ, 2010. 2 с.

²ГОСТ Р 52931-2008. Приборы контроля и регулирования технологических процессов. Общие технические условия. Введ. 2009-07-01. М.: Стандартиформ, 2009. 31 с.

³Государственная система обеспечения единства измерений. Расход воды на реках и каналах. Методика выполнения измерений методом «скорость – площадь»: МИ 1759-87: утв. ФГУП ВНИИФ 11.06.86: введ. в действие с 01.01.88. М.: Изд-во стандартов, 1987. 21 с.

Конструкция разработанного средства водоучета состоит из приборного оборудования и участка гидротехнического сооружения. В приборное оборудование входят датчик уровня (датчик гидростатического давления) и автономный блок дистанционного контроля, состоящий из контроллера-модема, аккумуляторной батареи, антенны GSM.

Участок гидротехнического сооружения представляет собой укрепленный (фиксированный бетонным покрытием) участок открытого канала, удовлетворяющего требованиям выполнения измерений расхода воды методом «скорость – площадь» при проведении работ по градуировке и поверке средств измерения согласно МВИ-05-90⁴.

Блок дистанционного контроля имеет вандалозащищенный корпус. Датчик уровня присоединен к блоку дистанционного контроля при помощи специального кабеля, размещенного в защитной трубе. Монтаж конструкции производится в створе пункта водоучета на боковой поверхности откоса канала на расстоянии 0,5 м от бермы канала. Схема установки средства водоучета на открытом оросительном канале показана на рисунке 1.

Средство водоучета работает следующим образом. Вода, поступающая в оросительный канал, создает высоту водного столба жидкости, которая измеряется гидростатическим датчиком давления, расположенным на дне канала в оголовке защитной металлической трубы. Гидростатический датчик давления определяет измеряемую величину (уровень воды) и преобразует ее в унифицированный токовый сигнал, поступающий в контроллер-модем блока дистанционного контроля и передачи данных по проводящему соединительному кабелю. Контроллер-модем, используя модуль входа, получает данные от гидростатического датчика давления,

⁴Гидромелиоративные каналы с фиксированным руслом. Методика выполнения измерений расхода воды методом «скорость – площадь»: МВИ-05-90: утв. и введ. в действие ПКТИ «Водавтоматика и метрология» 12.01.90. М.: Водавтоматика и метрология, 1990. 42 с.

при помощи специальной программы, включающей полученные в ходе испытаний уравнения градуировочной зависимости расхода воды от уровня, определяет мгновенный расход оросительной воды в канале и передает данные по модулю связи при помощи антенны GSM на компьютер оператора-гидрометриста диспетчерского пункта. Аккумуляторная батарея обеспечивает автономность электропитания устройства. Оперативность передачи данных на расстояние реализуется при помощи контроллера-модема, аккумуляторной батареи и антенны GSM, входящих в блок дистанционного контроля, который обеспечивает непрерывное преобразование входных унифицированных токовых сигналов в цифровой сигнал для передачи полученных данных технологических параметров по беспроводным каналам связи на диспетчерский пункт. Общий вид испытываемого средства водоучета показан на рисунке 2.

1 – берма канала; 2 – откос канала; 3 – антивандальный корпус; 4 – автономный блок дистанционного контроля и передачи данных; 5 – проводящий соединительный кабель; 6 – защитная металлическая труба; 7 – швеллер; 8 – гидростатический датчик давления; 9 – оголовок защитной металлической трубы; 10 – дно канала; 11 – опорная пластина; 12 – технологическое отверстие; h – высота уровня воды в канале, м

1 – canal berm; 2 – canal slope; 3 – anti-vandal case; 4 – autonomous unit for remote control and data transmission; 5 – conducting connecting cable; 6 – protective metal pipe; 7 – channel; 8 – hydrostatic pressure sensor; 9 – head of a protective metal pipe; 10 – the bottom of the canal; 11 – base plate; 12 – technological hole; h – the height of the water level in the canal, m

Рисунок 1 – Схема установки испытываемого средства водоучета на оросительном канале

Figure 1 – Installation diagram of the tested irrigation canal water metering device

Рисунок 2 – Общий вид испытываемого средства водоучета на канале МК-1 (автор фото А. Е. Шепелев)

Figure 2 – General view of the tested water metering device on canal МК-1 (photo by А. Е. Shepelev)

Период передачи данных задается согласно изменениям графика подачи воды на системе для пользователей-сельхозпроизводителей и вносится в программу контроллера-модема. Информация от контроллера-модема по каналу сотовой связи поступает непосредственно на сервер диспетчерского пункта. Сервер собирает и хранит принимаемую информацию, а также отправляет результат выполненной работы по запросу водопользователя через программу «клиент». Под «клиентом» подразумевается компьютерное устройство (программный компонент), которое отправляет запрос на сервер, касающийся выполнения определенных задач или предоставления конкретной информации за определенный период [8].

Для оперативного отслеживания необходимой информации во время натурных испытаний использовался переносной компьютер (ноутбук) с программным обеспечением «клиент», который посылал запросы на сервер для получения необходимых данных. На рисунке 3 показано окно оперативного уведомления, выводимое на монитор ноутбука, с необходимой информацией, включающей: наименование проводимых измерений на объекте, описание вида связи, дату и время измерения, температуру среды, период получения информации, состояние батареи, состояние сигнала GSM, а также встроенные возможности программы по уровню воды, сигнал об аварии датчика.

Рисунок 3 – Окно клиентского приложения средства водоучета
Figure 3 – Window of the client application of the water metering device

Первая часть испытаний включала проведение градуировки в контрольном створе фиксированного русла канала и получение градуировочной зависимости расхода воды от уровня [9]. Для проведения градуировки использовался градуированный контрольный створ на участке фиксированного русла канала, подготовленный для определения расхода воды с использованием традиционных средств измерений (гидрометрическая вертушка и гидрометрическая рейка) по методу выполнения измерений «скорость – площадь» МИ 1759-87³. Обработка результатов измерений производилась с помощью программы расчета расхода воды в открытом оросительном канале с фиксированным руслом методом «скорость – площадь», зарегистрированной в государственном реестре программ для ЭВМ 24 сентября 2020 г. (свидетельство № 2020661514) [10].

Полученная градуировочная зависимость расхода от уровня воды на исследуемом участке канала использовалась для дальнейшей тарировки средства водоучета.

Вторая часть испытаний включала проверку прибора средства водоучета на работоспособность, которая оценивалась по устойчивости передачи сигналов на сервер и точности показаний уровня воды в канале в диапазоне допустимой погрешности измерения.

Результаты и обсуждение. Испытание проходило на открытом канале Нижне-Манычской оросительной системы (МК-1) Багаевского филиала ФГБУ «Управление «Ростовмелиоводхоз». Краткая характеристика канала: диапазон измерения уровня воды от 0,3 до 3,0 м, диапазон измерения расхода воды от 1,3 до 9,0 м³/с, ширина канала по верху 12,6 м, ширина по дну 3,0 м, глубина 3,2 м.

В результате проведения градуировки в контрольном створе русла исследуемого канала получена градуировочная зависимость расхода воды от уровня, которая имеет вид: $Q = f(h) = 0,4961h^2 + 1,7319h - 0,4687$ (рисунок 4).

На основе полученных результатов была составлена таблица дан-

ных градуировочной зависимости $Q = f(h)$ на исследуемом участке канала (таблица 1).

Рисунок 4 – Градуировочная зависимость для определения расхода воды в указанном диапазоне измерений средства водоучета

Figure 4 – Calibration dependence for determining the water discharge in the specified measurement range of the water metering device

Таблица 1 – Данные градуировочной зависимости $Q = f(h)$

Table 1 – Data of the calibration dependence $Q = f(h)$

В м³/с
In m³/s

Уровень воды в канале h , м / Water level in canal h , m	Расход воды в канале Q / Canal water flow Q									
	Доля параметра уровня, м / Share of the level parameter, m									
	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,20
0,4	0,21	0,22	0,23	0,23	0,25	0,26	0,28	0,30	0,32	0,33
0,5	0,35	0,37	0,38	0,40	0,41	0,43	0,45	0,47	0,50	0,52
0,6	0,51	0,53	0,55	0,57	0,59	0,60	0,62	0,65	0,67	0,69
0,7	0,71	0,72	0,74	0,76	0,78	0,80	0,82	0,84	0,86	0,88
0,8	0,90	0,91	0,93	0,95	0,97	1,02	1,04	1,06	1,08	1,10
0,9	1,12	1,15	1,17	1,19	1,21	1,23	1,25	1,27	1,29	1,31
1,0	1,32	1,33	1,34	1,35	1,36	1,37	1,38	1,40	1,43	1,47
1,1	1,51	1,56	1,60	1,65	1,68	1,72	1,76	1,80	1,84	1,90
1,2	1,94	2,01	2,31	2,35	2,40	2,43	2,46	2,51	2,54	2,60
1,3	2,64	2,69	2,73	2,76	2,80	2,84	2,87	2,91	2,96	3,00
1,4	3,06	3,08	3,11	3,13	3,16	3,18	3,21	3,23	3,25	3,28
1,5	3,30	3,33	3,35	3,38	3,40	3,42	3,44	3,46	3,49	3,51

Продолжение таблицы 1

Table 1 continuation

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1,6	3,54	3,56	3,59	3,61	3,63	3,65	3,67	3,69	3,71	3,73
1,7	3,75	3,77	3,79	3,82	3,84	3,87	3,89	3,91	3,93	3,95
1,8	3,97	3,99	4,01	4,03	4,05	4,07	4,09	4,11	4,13	4,15
1,9	4,17	4,20	4,22	4,25	4,30	4,32	4,34	4,36	4,38	4,40
2,0	4,44	4,49	4,53	4,57	4,62	4,66	4,70	4,74	4,79	4,83
2,1	4,87	4,91	4,96	4,99	5,05	5,09	5,13	5,17	5,22	5,26
2,2	5,30	5,34	5,37	5,41	5,45	5,49	5,55	5,59	5,63	5,67
2,3	5,71	5,75	5,79	5,83	5,87	5,91	5,95	5,99	6,04	6,08
2,4	6,12	6,16	6,20	6,24	6,28	6,32	6,37	6,39	6,41	6,45
2,5	6,49	6,53	6,58	6,62	6,67	6,71	6,75	6,79	6,83	6,87
2,6	6,92	6,96	7,01	7,05	7,09	7,13	7,17	7,21	7,25	7,29
2,7	7,34	7,38	7,42	7,46	7,50	7,54	7,59	7,63	7,67	7,72
2,8	7,79	7,86	7,93	8,00	8,08	8,12	8,19	8,25	8,32	8,39
2,9	8,45	8,54	8,61	8,68	8,73	8,79	8,84	8,90	8,95	9,00

Относительная погрешность построения градуировочной характеристики сооружения (канала) определялась как среднее квадратичное отклонение результатов измерения расхода от соответствующих осредненных значений расхода по градуировочной характеристике, построенной на основании расчетов методом наименьших квадратов с использованием программы Microsoft Excel, согласно нормативному документу МВИ-05-90⁴ и учебно-методическому пособию [11]. Относительная погрешность построения градуировочной характеристики сооружения (канала) составила 2,67 %.

Проверка прибора средства водоучета на работоспособность оценивалась по устойчивости передачи сигналов и точности показаний уровня воды в канале. Была проведена проверка дистанционной передачи данных с помощью модема (интерфейса), входящего в блок дистанционного контроля, и внешних цифровых портативных устройств (мобильный телефон, ноутбук). При проведении испытаний прибора средства водоучета интервал между показаниями контролируемых параметров составлял 2 мин и принимался в течение 1 ч в дни проведения натурных испытаний. В результате испытаний были получены и переданы на расстояние (на сервер) контролируемые показатели уровня канала, измеренные средством водоучета, через

определенный интервал времени с одновременным отслеживанием оперативной информации на мониторе ноутбука. Полученная информация была собрана в электронные таблицы и обработана с определением расхода и объема воды в канале за определенный период при отслеживании относительной погрешности измерения. В таблице 2 представлены полученные и обработанные результаты измерений на канале МК-1 в день проведения испытаний (17.05.2021) с интервалом 2 мин в течение часа.

Погрешности измерений установлены путем сравнения полученных показаний прибора средства водоучета (датчика уровня) и данных измерений с помощью контрольной гидрометрической рейки на пункте водоучета. Общая относительная погрешность измерения испытываемого средства водоучета составила:

$$\delta_{\text{общ.}} = \delta_{\text{гр}} + \delta_{\text{ср.пр.2}} = 2,67 + 2,23 = 4,90 \%,$$

где $\delta_{\text{общ.}}$ – общая относительная погрешность при измерении с помощью испытываемого средства водоучета, %;

$\delta_{\text{гр}}$ – относительная погрешность построения градуировочной характеристики сооружения, %;

$\delta_{\text{ср.пр.2}}$ – средняя относительная погрешность при измерении с помощью приборного оборудования средства водоучета, %.

Таким образом, относительная погрешность не превышает 5 %, что соответствует требованиям к аналогичным средствам измерения (МИ 17-59-87³, ГОСТ Р 51657.2-2000⁵).

По результатам проведенных исследований нового средства водоучета разработан алгоритм оценки работоспособности испытываемого средства водоучета для открытого канала в диапазоне допустимой погрешности измерений по методу «скорость – площадь» (рисунок 5).

⁵ГОСТ Р 51657.2-2000. Водоучет на гидромелиоративных и водохозяйственных системах. Методы измерения расхода и объема воды. Классификация. Введ. 2001-07-01. М.: Изд-во стандартов, 2001. 6 с.

Таблица 2 – Сводная таблица полученных результатов измерений
Table 2 – Summary table of the obtained measurement results

№ приема сигнала / № signal reception	Время t / Time t	Уровень (по гид- рометрической рейке) h_1 , м / Level (by hydro- metric rod) h_1 , m	Расход (по гидро- метрической рейке) Q_1 , м ³ /с / Consump- tion (by hydrometric rod) Q_1 , m ³ /s	Уровень (по датчику) h_2 , м / Level (by sensor) h_2 , m	Расход (по дат- чику) Q_2 , м ³ /с / Flow rate (by sensor) Q_2 , m ³ /s	Относительная погрешность (по уровню) $\delta_{\text{пр.1}}$, % / Relative error (by level) $\delta_{\text{пр.1}}$, %	Относительная погрешность (по расходу) $\delta_{\text{пр.2}}$, % / Relative error (flow rate) $\delta_{\text{пр.2}}$, %
1	11:52	1,96	4,828	1,93	4,718	1,554	2,331
2	11:54	1,97	4,865	1,94	4,754	1,546	2,335
3	11:56	1,97	4,865	1,94	4,754	1,546	2,335
4	11:58	1,98	4,901	1,95	4,791	1,538	2,296
5	12:00	1,98	4,901	1,95	4,791	1,538	2,296
6	12:02	1,98	4,901	1,95	4,791	1,538	2,296
7	12:04	1,98	4,901	1,95	4,791	1,538	2,296
8	12:06	1,98	4,901	1,96	4,828	1,020	1,512
9	12:08	1,99	4,938	1,96	4,828	1,531	2,278
10	12:10	1,99	4,938	1,96	4,828	1,531	2,278
11	12:12	1,99	4,938	1,96	4,828	1,531	2,278
Средняя относительная погрешность при измерении с помощью приборного оборудования средства водоучета $\delta_{\text{ср.пр.2}}$, % / Average relative error when measuring with the instrumentation equipment of a water metering device $\delta_{\text{ср.пр.2}}$, %							2,230

Расшифровка обозначений: h – высота уровня воды в канале, м; t – установленный интервал времени между показаниями контролируемого параметра (уровня воды), с; $\delta_{гр}$ – относительная погрешность построения градуировочной характеристики сооружения, %; $Q = f(h)$ – функция градуировочной зависимости расхода воды от уровня; x, y, z – значения переменной арифметического выражения [12]; h_1 – высота уровня воды, определенная датчиком давления, м; h_2 – высота уровня воды, определенная гидрометрической рейкой, м; Q_1 – расход воды, определенный по градуировочной зависимости и значению h_1 , м³/с; Q_2 – расход воды, определенный по градуировочной зависимости и значению h_2 , м³/с; $\delta_{пр.1}$ – относительная погрешность по данным уровня воды, %; $\delta_{пр.2}$ – относительная погрешность по данным расхода воды, %; $\delta_{ср.в.}$ – относительная погрешность средства водоучета, %

Explanation of designations: h – height of the water level in the canal, m; t – the set time interval between the readings of the monitored parameter (water level), s; $\delta_{гр}$ – relative error in constructing the calibration characteristics of the structure, %; $Q = f(h)$ – the function of the calibration dependence of the water flow rate on the level; x, y, z – the values of the variable arithmetic expression [12]; h_1 – the height of the water level, determined by the pressure sensor, m; h_2 – the height of the water level, determined by the gauge rod, m; Q_1 – water consumption, determined by the calibration dependence and value h_1 , m³/s; Q_2 – water consumption, determined by the calibration dependence and value h_2 , m³/s; $\delta_{пр.1}$ – relative error according to water level data, %; $\delta_{пр.2}$ – relative error according to water consumption data, %; $\delta_{ср.в.}$ – relative error of the water meter, %

Рисунок 5 – Алгоритм оценки работоспособности испытываемого средства водоучета в диапазоне допустимой погрешности измерений

Figure 5 – Algorithm for assessing the performance of the monitored water metering device in the range of permissible measurement error

Данный подход обеспечивает проверку работоспособности в диапазоне допустимой погрешности новых испытываемых средств водоучета, состоящих из приборного оборудования (включающего датчик уровня) и гидротехнического сооружения (открытого канала), отвечающего требованиям выполнения измерений расхода воды методом «скорость – площадь».

Выводы. Оценку работоспособности испытываемого средства водоучета в диапазоне допустимой погрешности измерений предлагается проводить в два этапа испытаний.

В результате выполнения первого этапа испытаний на исследуемом участке открытого канала (МК-1) получена градуировочная зависимость для определения расхода воды в указанном диапазоне измерений средства водоучета и установлена ее относительная погрешность измерения, равная 2,67 %.

В результате выполнения второго этапа испытаний была проведена проверка дистанционной передачи данных контролируемого показателя (уровня воды), измеренного прибором средства водоучета, и получены данные для их обработки в электронном виде (таблица 2). На основе данных определена средняя относительная погрешность при измерении приборным оборудованием средства водоучета (2,23 %) и общая относительная погрешность измерения испытываемого средства водоучета (4,90 %), это значение не противоречит допустимой погрешности измерений согласно нормативно-методическим документам.

По результатам проведенных исследований разработан алгоритм оценки работоспособности и определения погрешности измерения для новых испытываемых средств водоучета, состоящих из приборного оборудования (включающего датчик уровня) и гидротехнического сооружения (открытого канала), отвечающего требованиям выполнения измерений расхода воды методом «скорость – площадь».

Список источников

1. Актуальные вопросы развития мелиоративной отрасли и использования водных ресурсов в АПК / В. Н. Щедрин, А. В. Колганов, Г. А. Сенчуков, В. Д. Гостищев // Мелиорация и водное хозяйство. 2021. № 4. С. 8–11.
2. Кизяев Б. М., Погодаев А. Е., Филиппов Е. Г. Водопользование и водоучет на водохозяйственных и мелиоративных системах агропромышленного комплекса страны. М.: ВНИИА, 2004. 132 с.
3. Матюгин М. А., Мильцын Д. А. Современные приборы и методы измерения расхода воды в открытых водотоках // Вестник ВГАВТ. 2015. Вып. 44, разд. 2. С. 1–11.
4. Соболин Г. В., Сатункин И. В., Гулянов Ю. А. Учет воды на оросительных системах // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2004. № 4(4). С. 46–48.
5. Loizou K., Koutroulis E. Water level sensing: State of the art review and performance evaluation of a low-cost measurement system // Measurement. 2016. Vol. 89. P. 204–214. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.04.019>.
6. James C. S. Flow-measuring structures // Hydraulic Structures. 2020. P. 243–282. DOI: 10.1007/978-3-030-34086-5_7.
7. Васильченко А. П., Шепелев А. Е. К определению расхода воды в канале Р-3 Райгородской оросительной системы ФГБУ «Управление «Волгоградмелиоводхоз» // Актуальные направления развития мелиоративного комплекса: сб. науч. тр. по материалам Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 90-летию создания ФГБНУ «РосНИИПМ», г. Новочеркасск, 10 сент. 2021 г. Новочеркасск: РосНИИПМ, 2021. С. 210–218.
8. Клиент (информатика) [Электронный ресурс]. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Клиент_\(информатика\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Клиент_(информатика)) (дата обращения: 15.07.2021).
9. Юченко Л. В., Редина А. В., Чернова О. Н. Результаты первого этапа натурных испытаний разрабатываемого средства водоучета // Актуальные направления развития мелиоративного комплекса: сб. науч. тр. по материалам Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 90-летию создания ФГБНУ «РосНИИПМ», г. Новочеркасск, 10 сент. 2021 г. Новочеркасск: РосНИИПМ, 2021. С. 47–55.
10. Программа расчета расхода воды в открытом оросительном канале с фиксированным руслом методом «скорость – площадь»: свидетельство о гос. регистрации прогр. для ЭВМ № 2020661514 / Чураев А. А., Васильченко А. П., Шепелев А. Е., Юченко Л. В., Кореновский А. М., Чернова О. Н.; правообладатель ФГБНУ «РосНИИПМ». Заявка № 2020660511; заявл. 14.09.20; опубл. 24.09.20, Бюл. № 3. 1 с.
11. Григорьян С. Г. Метрология, стандартизация и технические измерения: учеб.-метод. пособие. Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2017. 52 с.
12. Богомоллов Н. В. Алгебра и начала анализа: учеб. пособие. М.: Юрайт, 2017. 200 с.

References

1. Shchedrin V.N., Kolganov A.V., Senchukov G.A., Gostishchev V.D., 2021. *Aktual'nye voprosy razvitiya meliorativnoy otrasli i ispol'zovaniya vodnykh resursov v APK* [Topical issues of the development of reclamation industry and the use of water resources in agro-industrial complex]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* [Irrigation and Water Management], no. 4, pp. 8–11. (In Russian).
2. Kizyaev B.M., Pogodaev A.E., Filippov E.G., 2004. *Vodopol'zovanie i vodouchet na vodokhozyaystvennykh i meliorativnykh sistemakh agropromyshlennogo kompleksa strany*

[Water Use and Water Accounting in Water Management and Reclamation Systems of the Country's Agro-industrial Complex]. Moscow, VNIIA, 132 p. (In Russian).

3. Matyugin M.A., Miltsyn D.A., 2015. *Sovremennyye pribory i metody izmereniya raskhoda vody v otkrytykh vodotokakh* [Modern devices and methods for measuring water discharge in open waterways]. *Vestnik VGAVT* [Bull. VGAVT], iss. 44, sec. 2, pp. 1-11. (In Russian).

4. Sobolin G.V., Satunkin I.V., Gulyanov Yu.A., 2004. *Uchet vody na orositel'nykh sistemakh* [Water recording in irrigation systems]. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of Orenburg State Agrarian University], no. 4(4), pp. 46-48. (In Russian).

5. Loizou K., Koutroulis E., 2016. Water level sensing: State of the art review and performance evaluation of a low-cost measurement system. *Measurement*, vol. 89, pp. 204-214, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.04.019>.

6. James C.S., 2020. Flow-measuring structures. *Hydraulic Structures*, pp. 243-282, DOI: 10.1007/978-3-030-34086-5_7.

7. Vasilchenko A.P., Shepelev A.E., 2021. *K opredeleniyu raskhoda vody v kanale R-3 Raygorodskoy orositel'noy sistemy FGBU "Upravlenie "Volgogradmeliovodkhoz"* [To water consumption determination in the P-3 canal of the Raigorod irrigation system of Federal State budgetary establishment "Volgogradmeliovodkhoz"]. *Aktual'nye napravleniya razvitiya meliorativnogo kompleksa: sbornik nauchnykh trudov po materialam Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 90-letiyu sozdaniya FGBNU "RosNIIPM"* [Actual Directions of Development of the Reclamation Complex: Proc. of International Scientific-Practical Conference, Dedicated to the 90th Anniversary of the Establishment of the RSRILIP]. Novocherkassk, RosNIIPM, pp. 210-218. (In Russian).

8. *Klient (informatika)* [Client (informatics)], available: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Клиент_\(информатика\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Клиент_(информатика)) [accessed 15.07.2021]. (In Russian).

9. Yuchenko L.V., Redina A.V., Chernova O.N., 2021. *Rezultaty pervogo etapa naturnykh ispytaniy razrabatyvaemogo sredstva vodoucheta* [Results of the first stage of full-scale experiments of water metering facility under development]. *Aktual'nye napravleniya razvitiya meliorativnogo kompleksa: sbornik nauchnykh trudov po materialam Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 90-letiyu sozdaniya FGBNU "RosNIIPM"* [Proc. of International Scientific-Practical Conference, Dedicated to the 90th Anniversary of the Establishment of the RSRILIP]. Novocherkassk, RosNIIPM, pp. 47-55. (In Russian).

10. Churaev A.A., Vasilchenko A.P., Shepelev A.E., Yuchenko L.V., Korenovskiy A.M., Chernova O.N., 2020. *Programma rascheta raskhoda vody v otkrytom orositel'nom kanale s fiksirovannym ruslom metodom "skorost' – ploshchad'"* [Program for calculating water discharge in an open irrigation canal with a fixed channel by the "speed – area" method]. Certificate of state registration of computer programs, no. 2020661514. (In Russian).

11. Grigor'yan S.G., 2017. *Metrologiya, standartizatsiya i tekhnicheskie izmereniya: ucheb.-metod. posobie* [Metrology, Standardization and Technical Measurements: textbook]. Novocherkassk, YRSPU (NPI), 52 p. (In Russian).

12. Bogomolov N.V., 2017. *Algebra i nachala analiza: ucheb. posobie* [Algebra and the Beginning of Analysis: textbook]. Moscow, Yurayt Publ., 200 p. (In Russian).

Информация об авторах

А. А. Чураев – заместитель директора по науке в области гидротехнических сооружений, кандидат технических наук;

А. Е. Шепелев – ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук;

Л. В. Юченко – научный сотрудник.

Information about the authors

A. A. Churaev – Deputy Director for Science in the Field of Hydraulic Structures, Candidate of Technical Sciences;

A. E. Shepelev – Leading Researcher, Candidate of Technical Sciences;

L. V. Yuchenko – Researcher.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Все авторы в равной степени несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата и других нарушений в сфере этики научных публикаций.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

All authors are equally responsible for detecting plagiarism, self-plagiarism and other ethical violations in scientific publications.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 19.11.2021; одобрена после рецензирования 17.12.2021; принята к публикации 21.12.2021.

The article was submitted 19.11.2021; approved after reviewing 17.12.2021; accepted for publication 21.12.2021.