

УДК 626.824:681.12

DOI: 10.31774/2658-7890-2020-4-135-149

А. П. Васильченко, А. М. Кореновский

Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск,
Российская Федерация

УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ВОДЫ НА ГИДРОМЕЛИОРАТИВНЫХ СИСТЕМАХ

Цель: анализ существующих ультразвуковых методов и приборов для измерения расхода воды на гидромелиоративных системах. Проблема рационального использования водных ресурсов стоит во всех областях, в т. ч. и сельском хозяйстве. Она не может быть решена без рассмотрения вопроса водоучета и водораспределения. Основной задачей системы водоучета на гидромелиоративных системах является учет объема воды, взятой из водозабора и поданной в оросительную сеть. Для этих целей применяются приборы, осуществляющие измерение расхода воды, – расходомеры. Расходомерами, способными решать сложные задачи при измерении расхода, являются ультразвуковые (акустические) расходомеры. В настоящее время для определения расхода воды на мелиоративных объектах существует несколько методов измерения: ультразвуковой, радарный, метод Доплера, кросс-корреляционный метод и метод Transit-Time. На основе данных методов создано большое количество модификаций приборов для определения расходов воды: уровнемеры, радарные расходомеры, доплеровские расходомеры, погружные кросс-корреляционные расходомеры, время-импульсные расходомеры.

Выводы. Расходомеры, работающие на основе уровнемеров, и радарные расходомеры нецелесообразно использовать в узлах коммерческого водоучета. Они имеют высокие погрешности измерения расхода, так как уровнемеры измеряют только уровень, а скорость принимается как величина постоянная, радарные расходомеры же хоть и измеряют скорость течения, но это скорость не всего потока, а только поверхностного слоя. Расход воды, измеряемый доплеровскими и кросс-корреляционными расходомерами, зависит от количества твердых включений в потоке. Но так как вода в каналах и закрытых трубопроводах на гидромелиоративных системах имеет их большое количество, то данные расходомеры имеют высокую точность измерения расхода. Время-импульсные расходомеры, так же как доплеровские и кросс-корреляционные расходомеры, обладают высокой точностью измерений, однако не зависят от количества твердых включений в потоке.

Ключевые слова: водоучет; ультразвук; уровнемер; радарный расходомер; доплеровский расходомер; кросс-корреляционный расходомер; время-импульсный расходомер.

A. P. Vasilchenko, A. M. Korenovskiy

Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk,
Russian Federation

ULTRASONIC METHODS AND INSTRUMENTS FOR MEASURING WATER FLOW IN HYDRORECLAMATION SYSTEMS

Purpose: analysis of existing ultrasonic methods and devices for metering water flow in irrigation and drainage systems. The problem of rational use of water resources exists in all areas, including agriculture. It cannot be resolved without considering the issue of water me-



tering and water distribution. The main task of the water accounting system in irrigation and drainage systems is measuring the volume of water taken from the water intake and delivered to the irrigation network. For these purposes, flow meters – devices that measure the flow of water, are used. Ultrasonic (acoustic) flow meters are flow meters capable of solving complex problems in flow measurement. Currently, there are several measurement methods to determine the water flow rate at reclamation facilities: ultrasonic, radar, Doppler method, cross-correlation method and Transit-Time method. Based on these methods, a large number of modifications of devices for determining water flow rates have been created: level gauges, radar flow meters, Doppler flow meters, submersible cross-correlation flow meters, pulse-time flow meters. **Conclusions.** Flow meters based on level gauges and radar flow meters are impractical to use in commercial water metering units. They have high flow measurement errors, since level gauges measure only the level, and the speed is taken as a constant value, while radar flow meters measure the flow rate, but this is not the speed of the entire flow, but only of the surface layer. The flow rate measured by Doppler and cross-correlation meters depends on the amount of solids in the flow. But since the water in canals and closed pipelines on irrigation and drainage systems has a large number of solids, these flow meters have a high accuracy of flow measurement. Pulse time meters, as well as Doppler and cross-correlation meters, have high measurement accuracy, but do not depend on the amount of solids in the flow.

Key words: water accounting; ultrasound; level meter; radar flow meter; Doppler flow meter; cross-correlation flow meter; time-impulse flow meter.

Введение. За последние 20–25 лет представление о водных ресурсах как о неисчерпаемом источнике природных ресурсов изменилось коренным образом. Проблема рационального использования водных ресурсов стоит во всех областях, в т. ч. и сельском хозяйстве [1]. Она не может быть решена без рассмотрения вопроса водоучета и водораспределения. В условиях, когда вода становится платным ресурсом (платное водопользование), водоучет позволяет осуществлять сбор, анализ и обработку информации с помощью комплекса приемов и методик, предназначенных для целей водоучета. Также он позволяет не только максимально удовлетворить потребителей воды, но и минимально нанести ущерб окружающей среде. Основной задачей системы водоучета на гидромелиоративных системах является учет объема воды, взятой из водозабора и поданной в оросительную сеть. Для этих целей на данных системах применяются приборы, осуществляющие измерение расхода воды, – расходомеры.

От расходомеров требуют точности, широких эксплуатационных характеристик и простоты применения. К сожалению, не все типы расходомеров могут обеспечить соблюдение всех требований. Расходомерами,

способными решать сложные задачи при измерении расхода, являются ультразвуковые (акустические) расходомеры. Ультразвуковые расходомеры – это устройства, принцип действия которых основан на измерении величин, изменяющихся при прохождении акустических колебаний сквозь измеряемую среду [2–4].

Целью статьи является анализ существующих ультразвуковых методов и приборов для измерения расхода воды на гидромелиоративных системах.

В настоящее время для определения расхода воды на мелиоративных объектах существует несколько методов измерения: ультразвуковой, радарный, метод Доплера, кросс-корреляционный метод и метод Transit-Time [5].

На основе вышеперечисленных методов создано большое количество модификаций приборов для определения расходов воды [6, 7], которые представлены ниже.

Уровнемеры, использующиеся в качестве расходомеров. Принцип работы основан на измерении только уровня воды (рисунок 1) [8]. Эти уровнемеры устанавливаются на лотках Вентури или Паршалла либо непосредственно над каналом. В данном способе при определении расхода основную роль играет уровень, а средняя скорость не измеряется вообще, а подразумевается, что она величина постоянная [9, 10].

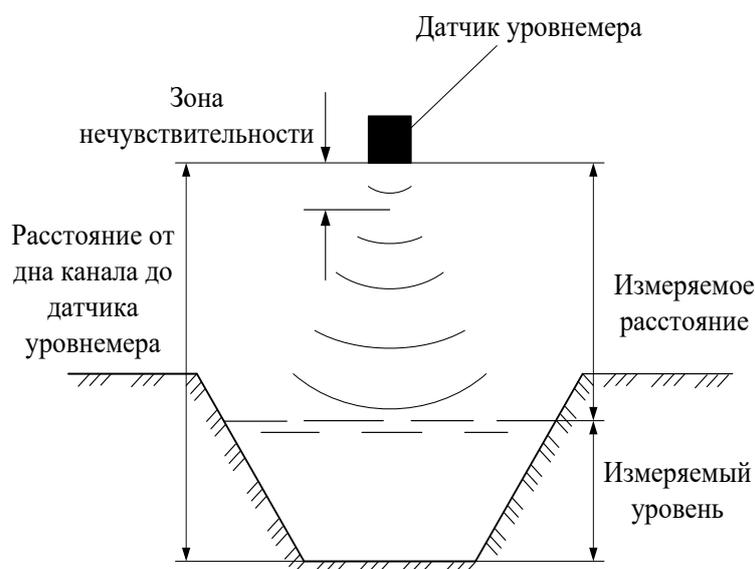
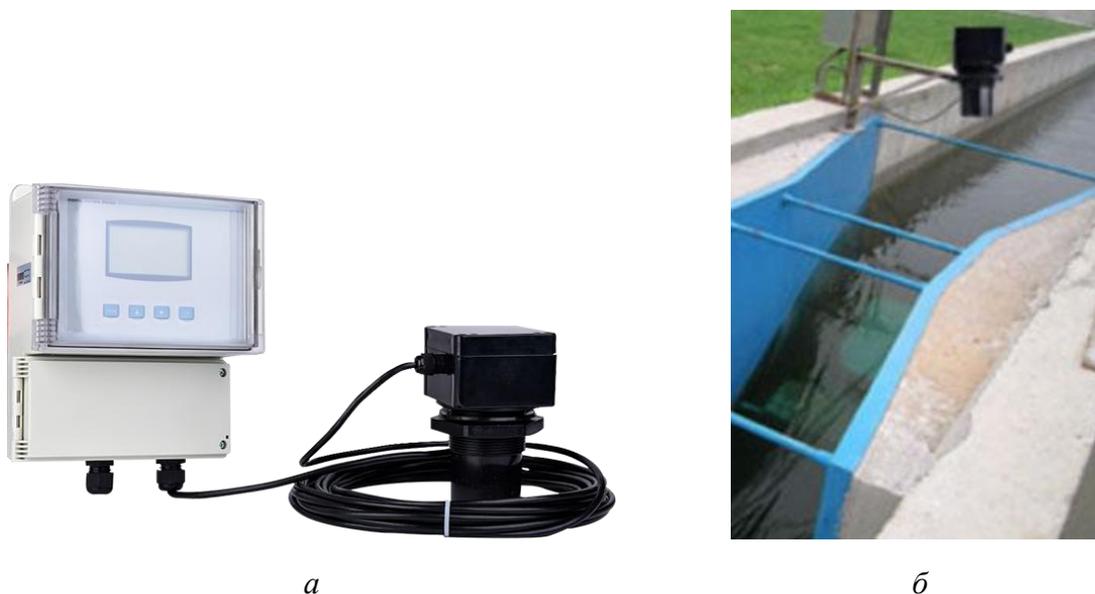


Рисунок 1 – Принцип работы уровнемера

Основным преимуществом данных расходомеров является их дешевизна, а также простота при установке и обслуживании (рисунок 2). Главным недостатком является то, что скорость потока воды остается неизвестной, это увеличивает вероятность ошибки.



а – прибор; *б* – способ установки на канале

Рисунок 2 – Уровнемер (источник: <https://www.streamlux.ru/oborudovanie/rashodomer-dlya-otkrytyh-kanalov-slo-500f/>)

Погрешность измерения прибора значительно увеличивается при наличии подпора перед ним. Любой посторонний предмет или начинающийся засор в канале приводит к появлению подпора. Как только появляется подпор перед прибором, погрешность измерений может достигать 100 %. Кроме того, уровнемеры не позволяют их использовать при наличии волны, а также при неблагоприятных погодных условиях (туман, интенсивные осадки и т. д.) [8, 11].

Как правило, расходомеры, работающие на основе уровнемеров, применяются для получения приблизительных данных, т. е. для некоммерческого водоучета.

Радарные бесконтактные расходомеры. В этих приборах производится измерение уровня и скорости поверхностного стока (рисунок 3). Они

применяются для измерения расхода в открытых каналах и закрытых безнапорных трубопроводах [6, 10, 12].

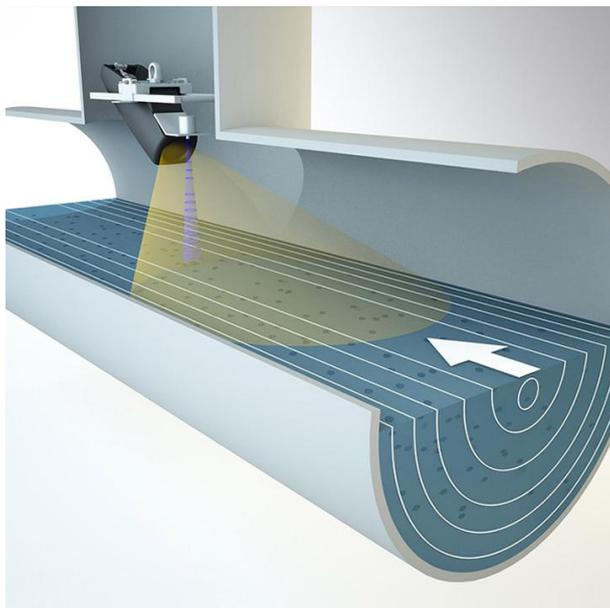


Рисунок 3 – Принцип работы радарного бесконтактного расходомера (источник: https://n-eco.ru/equipment/rashodomer_raven-eye)

Они представляют собой разновидность ультразвукового устройства, работающего на основе метода «скорость – площадь», измеряя как уровень потока, так и его скорость течения. Радар расходомера представлен на рисунке 4.



Рисунок 4 – Радар расходомера (источник: https://n-eco.ru/equipment/rashodomer_raven-eye)

Главное преимущество радарного расходомера – простая и удобная установка и обслуживание, так как бесконтактный датчик находится над поверхностью потока и не имеет контакта с водой (рисунок 5).



Рисунок 5 – Радарный расходомер
(источник: https://n-eco.ru/equipment/rashodomer_raven-eye)

В связи с тем, что прибор измеряет не только уровень воды, но и скорость потока, он имеет большое преимущество перед уровнемером. К преимуществам можно отнести также возможность измерения расходов в широком диапазоне.

Недостатком данного типа устройств является то, что их погрешность может достигать высоких значений (до 50 %). Эта погрешность обусловлена сильной зависимостью результата измерения от наличия волн на поверхности воды, так же как у уровнемеров. Еще одним недостатком является то, что нет определенного соотношения между скоростью на поверхности потока и средней скоростью потока. Эти приборы имеют высокую стоимость, что также является их недостатком [10, 12].

Применение данного типа устройств рекомендуется при невозможности использовать более точные расходомеры. В связи с этим использование таких расходомеров считается нецелесообразным на узлах коммерческого водоучета.

Доплеровские расходомеры. Приборы, использующие метод Доплера, основываются на определении изменения частоты посланного сигнала и принятого, который отразился от частиц, движущихся в потоке воды (рисунок 6) [13–15]. Они применяются в напорных и безнапорных системах, а также на открытых каналах.

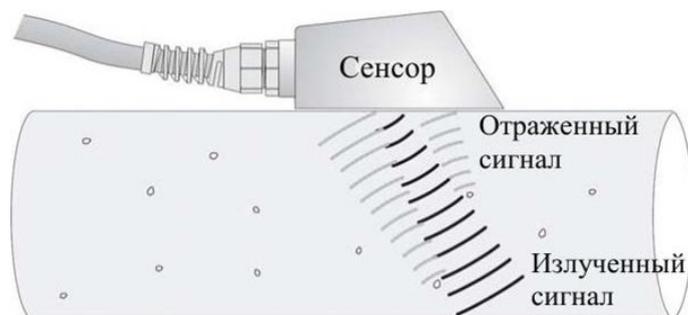


Рисунок 6 – Принцип работы доплеровского расходомера (источник: <https://ozlib.com/htm/img/21/20119/61.png>)

Расходомеры, работающие на методе Доплера, бывают как накладные, так и погружные. Накладные расходомеры применяются на трубопроводах, а погружные расходомеры – на открытых безнапорных каналах для измерения скорости и расхода потока (рисунок 7).



a – для труб (источник: <https://rusautomation.ru/rashodomery/dynasonics-dfx/>);
б – для открытых каналов (источник: http://granat-e.ru/flowmeter_avfm_6-1.html)

Рисунок 7 – Доплеровский расходомер

Основной проблемой при измерении скорости потока является то, что скорость движущихся частиц в разных слоях потока не одинакова. Так,

скорость частиц, движущихся около дна или стенок, значительно меньше, чем в середине потока. Над поверхностью потока скорость движения частиц также уменьшается. На скорость перемещения частиц в потоке также оказывают влияние многие факторы, такие как шероховатость поверхности, характер и величина донных отложений в канале, характеристики потока и т. п. В связи с этим вычисляется среднее значение скорости потока.

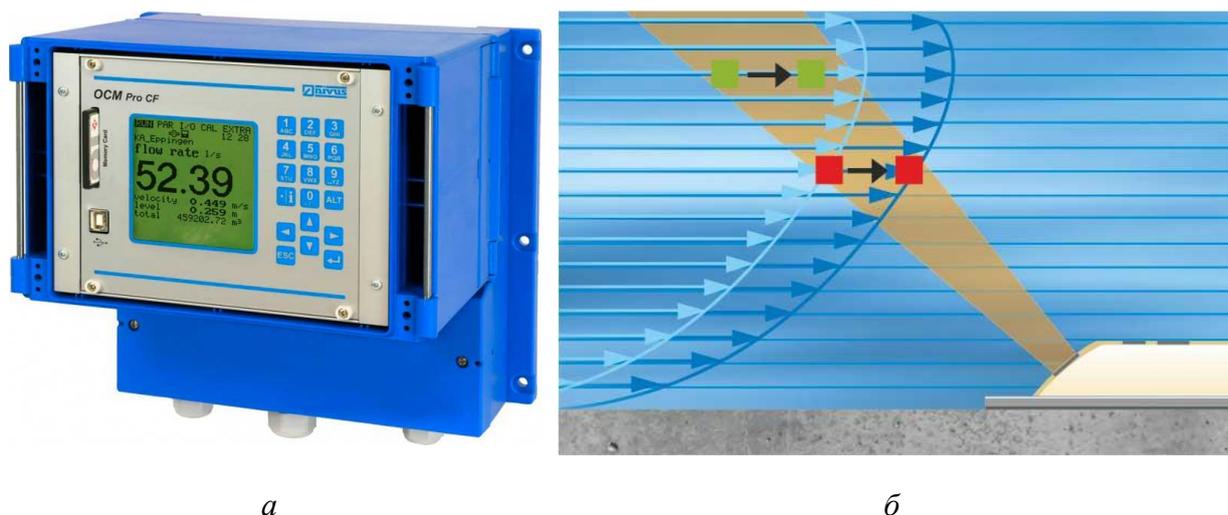
Недостатком доплеровских расходомеров является то, что погрешность показаний сильно зависит от количества твердых включений в потоке.

Однако при соблюдении всех требований к измеряемой жидкости доплеровские расходомеры показывают высокую точность измерений.

Погружные кросс-корреляционные расходомеры. Погружные кросс-корреляционные расходомеры, использующие метод кросс-корреляции, были разработаны и запатентованы немецкой фирмой в 2000 г. Данный метод схож с методом Доплера, при том что это два разных метода. Метод кросс-корреляции, использующий ультразвук, позволяет определить координаты частиц в потоке, разделенном на слои, число которых может достигать до 16 (рисунок 8). Основываясь на данных о временной задержке посланного излучателем сигнала, прибор создает обобщенную картинку и суммирует отдельные точки среза. В результате удается получить двухмерное изображение частиц, движущихся в потоке, такие изображения называют «ультразвуковыми фотографиями». Частота их создания впечатляет – до 1000 раз в секунду. Таким образом, удается измерять скорость движущихся частиц по уровням потока напрямую и строить реальную эпюру, которая выводится на экран прибора (рисунок 9) [16–20].

Достоинство данного метода – высокая точность, при которой не учитываются параметры шероховатости трубопровода или канала.

Недостатки данного способа – относительно высокая стоимость и зависимость от количества твердых включений в потоке, аналогично доплеровским расходомерам.



а – прибор; б – принцип работы

Рисунок 8 – Кросс-корреляционный расходомер (источник: <http://petrospec.ru/ultrazvukovoj-statsionarnyj-raskhodomer-nivus-ocm-pro-cf>)



Рисунок 9 – Реальная эпюра скорости потока (источник: <http://petrospec.ru/ultrazvukovoj-statsionarnyj-raskhodomer-nivus-ocm-pro-cf>)

Время-импульсные расходомеры. Они работают по методу Transit-Time, т. е. «проходящему времени». Этот метод основан на измерении времени прохода ультразвукового сигнала как по течению потока, так и против его течения [18]. Тот ультразвуковой сигнал, что движется по течению потока, проходит расстояние быстрее, чем сигнал,двигающийся против течения (рисунок 10). Исходя из этого и рассчитывается скорость течения потока [15, 21–23].

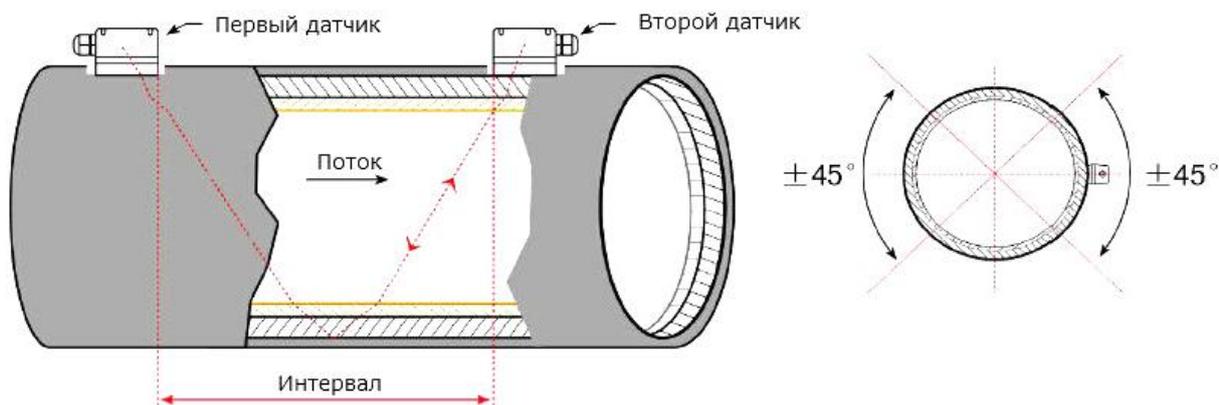
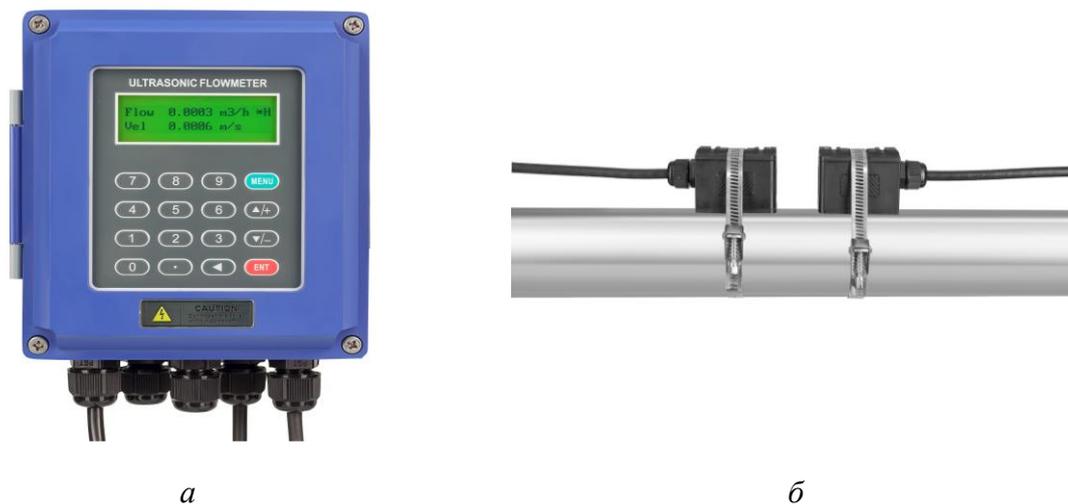


Рисунок 10 – Принцип работы время-импульсного расходомера (источник: <https://www.streamlux.ru/oborudovanie/statsionarnyi-rashodomer>)

Для преобразования ультразвукового сигнала в таких расходомерах устанавливают два или четыре смещенных вдоль движения воды датчика-пьезоэлемента. Датчики могут устанавливаться внутри потока (на внутренних стенках трубы или канала) или снаружи трубопровода (в этом случае сигнал проходит через наружную стенку) (рисунок 11). В зависимости от применяемых датчиков счетчики могут устанавливаться как в открытых, так и в закрытых самотечных системах.



а *б*
а – прибор; *б* – установка на трубопроводе

Рисунок 11 – Время-импульсный расходомер (источник: <https://www.streamlux.ru/oborudovanie/statsionarnyi-rashodomer>)

Применимость приборов приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Применимость приборов

Вид прибора, характеристика	Что измеряют	Способ установки	Место установки
Уровнемеры	Уровень	Над потоком	Лотки и каналы
Радарные бесконтактные расходомеры	Расход	Над потоком	Лотки и каналы, безнапорные трубопроводы
Доплеровские расходомеры	Расход	В потоке	Каналы, напорные и безнапорные трубопроводы
Погружные кросс-корреляционные расходомеры	Расход	В потоке	Каналы, напорные и безнапорные трубопроводы
Время-импульсные расходомеры	Расход	В потоке	Каналы, напорные и безнапорные трубопроводы

Существуют еще и другие типы расходомеров, однако они слабо распространены ввиду их очевидных недостатков при работе. Одним из этих недостатков является то, что они работают только в чистой воде.

Выводы

1 Расходомеры, работающие на основе уровнемеров, и радарные расходомеры нецелесообразно использовать на узлах коммерческого водочета, так как они имеют высокие погрешности измерения расхода. Уровнемеры измеряют только уровень, а скорость принимается как величина постоянная, что приводит к высокой погрешности измерения. Радарные расходомеры хоть и измеряют скорость течения, но это скорость течения не всего потока, а только поверхностного слоя, что также ведет к высокой погрешности измерения.

2 Расход воды, измеряемый доплеровскими и кросс-корреляционными расходомерами, зависит от количества твердых включений в потоке. Но так как вода в каналах и закрытых трубопроводах на гидромелиоративных системах имеет их большое количество, то данные расходомеры имеют высокую точность измерения расхода.

3 Время-импульсные расходомеры, так же как доплеровские и кросс-корреляционные расходомеры, обладают высокой точностью измерений, однако не зависят от количества твердых включений в потоке.

Список использованных источников

1 Пути совершенствования планового водопользования на оросительных системах: науч. обзор / В. Н. Щедрин, А. С. Штанько, О. В. Воеводин, А. Л. Кожанов,

С. Л. Жук, А. Е. Шепелев; ФГБНУ «РосНИИПМ». – Новочеркасск, 2014. – 36 с. – Деп. в ВИНТИ 03.07.14, № 194-В2014.

2 Абзалилова, Ю. Р. Выбор ультразвуковых расходомеров / Ю. Р. Абзалилова // Academy. – 2017. – № 1(16). – С. 8–9.

3 Варичев, М. А. Перспективы применения ультразвука для определения расхода воды в открытых каналах оросительных сетей / М. А. Варичев // Вопросы мелиорации. – 2007. – № 5-6. – С. 52–59.

4 Васильев, Т. Р. Применение оптико-акустического эффекта в ультразвуковых расходомерах / Т. Р. Васильев, А. Г. Кокуев // Научно-практические исследования. – 2017. – № 3(3). – С. 53–54.

5 Масумов, Р. Р. Методы измерения расхода воды на реках и каналах, в напорных трубопроводах насосных станций и оросительных систем / Р. Р. Масумов. – Ташкент: Науч.-информ. центр МКВК, 2015. – 84 с.

6 Матюгин, М. А. Современные приборы и методы измерения расхода воды в открытых водотоках / М. А. Матюгин, Д. А. Мильцын // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. – 2015. – № 44. – С. 66–76.

7 Как выбрать расходомер для самотечных каналов по цене и качеству [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://vistaros.ru/stati/rasho-domeryi/kak-vybrat-schyotchik-stochnyh-vod.html/>, 2020.

8 Савенков, А. В. К вопросу о перспективности ультразвукового метода измерения уровня жидкости / А. В. Савенков // Приоритетные научные направления: от теории к практике. – 2016. – № 32-1. – С. 187–191.

9 Егоров, Н. Л. Измерение расхода жидкости с помощью лотков Вентури при свободном и затопленном истечении / Н. Л. Егоров, О. Д. Лойцкер, М. Н. Шафрановский // Водоснабжение и санитарная техника. – 2016. – № 1. – С. 66–71.

10 Конев, А. В. Измерение расхода жидкости в безнапорных потоках. Анализ современных методов / А. В. Конев // Журнал «ИСУП». – 2019. – № 3(81). – С. 49–54.

11 Савенков, А. В. К вопросу о погрешности измерения уровня жидкости ультразвуком / А. В. Савенков, П. П. Першенков // Actualscience. – 2016. – Т. 2, № 10. – С. 91–92.

12 Емельянов, В. А. Приборный учет расхода очищенных сточных вод / В. А. Емельянов, Е. В. Дашин // Мир измерений. – 2011. – № 10. – С. 14–17.

13 Эффект Доплера в неравномерно движущихся структурах / И. Л. Хазиев, Е. С. Устинова, А. Г. Глущенко, Е. П. Глущенко // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 5. – С. 125–128.

14 Давыдов, В. В. О некоторых особенностях исследования потока жидких сред методом Доплера / В. В. Давыдов, С. В. Кружалов, В. А. Вологдин // Оптический журнал. – 2017. – Т. 84, № 8. – С. 77–83.

15 Johnson, D. Ultrasonic flowmeters: a 'sound' technology / D. Johnson // Control Engineering. – 2002. – Vol. 10. – P. 33–38.

16 Складенко, М. С. Оценка точности методов трекинга для определения 2D-координат и скоростей механических систем по данным цифровой фотосъемки / М. С. Складенко // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 1. – С. 125–135.

17 Горнев, Ю. В. Выбор расходомеров для самотечных каналов / Ю. В. Горнев // Сантехника. – 2018. – Т. 5, № 5. – С. 44–49.

18 Кросс-корреляционные приборы учета (расходомеры) сточных вод Nivus для самотечных каналов, напорных и безнапорных трубопроводов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://vistaros.ru/stati/rashodomeryi/kross-korrelyatsionnye-pribery-ucheta-rashodomery-stochnyh-vod-nivus-dlya-samotechnyh-kanalov-napornyh-i-beznapornyh-truboprovodov.html>, 2020.

19 Талулаев, С. Г. Анализ ультразвуковых методов измерения расхода жидкости /

С. Г. Талулаев // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2012. – № 1(2). – С. 157–159.

20 Никитин, Е. Г. Применение корреляционного метода для измерения расхода жидкости в ультразвуковых расходомерах / Е. Г. Никитин, В. К. Сырчин // Интеллектуальные системы и микросистемная техника: материалы науч.-практ. конф., пос. Эльбрус, 3–9 февр. 2019 г. / Нац. исслед. ун-т «МИЭТ». – М., 2019. – С. 112–120.

21 Чижов, Н. С. Реализация ультразвукового расходомера воды на основе время-импульсного метода / Н. С. Чижов // Наука, техника и образование. – 2017. – № 4(34). – С. 65–69.

22 Канаев, А. Н. К вопросу измерения расходов воды в трубопроводах больших диаметров / А. Н. Канаев, А. И. Поляков, М. Г. Новиков // Водоочистка, водоподготовка, водоснабжение. – 2008. – № 11(11). – С. 10–14.

23 Rajita, G. Review on transit time ultrasonic flowmeter / G. Rajita, N. Mandal // 2016 2nd International Conference on Control, Instrumentation, Energy & Communication (CIEC). – 2016. – P. 88–92. – DOI: 10.1109/CIEC.2016.7513740.

References

1 Shchedrin V.N., Shtanko A.S., Voevodin O.V., Kozhanov A.L., Zhuk S.L., Shepelev A.E., 2014. *Puti sovershenstvovaniya planovogo vodopol'zovaniya na orositel'nykh sistemakh: nauchnyy obzor* [Ways for Improving Planned Water Use in Irrigation Systems: scientific review]. Novocherkassk, 36 p., deposited in VINITI on 03.07.2014, no. 194-V2014. (In Russian).

2 Abzalilova Yu.R., 2017. *Vybor ul'trazvukovykh raskhodomerov* [Choice of Ultrasonic Flow Meters]. Academy, no. 1(16), pp. 8-9. (In Russian).

3 Varichev M.A., 2007. *Perspektivy primeneniya ul'trazvuka dlya opredeleniya raskhoda vody v otkrytykh kanalakh orositel'nykh setey* [Prospects for using ultrasound to determine the water flow rate in open canals of irrigation networks]. *Voprosy melioratsii* [Reclamation Issues], no. 5-6, pp. 52-59. (In Russian).

4 Vasiliev T.R., Kokuev A.G., 2017. *Primeneniye optiko-akusticheskogo effekta v ul'trazvukovykh raskhodomerakh* [Application of the optical-acoustic effect in ultrasonic flow meters] *Nauchno-prakticheskie issledovaniya* [Scientific and Practical Research], no. 3(3), pp. 53-54. (In Russian).

5 Masumov R.R., 2015. *Metody izmereniya raskhoda vody na rekakh i kanalakh, v napornykh truboprovodakh nasosnykh stantsiy i orositel'nykh sistem* [Methods for measuring water flow on rivers and canals, in pressure pipelines of pumping stations and irrigation systems]. Tashkent, Scientific-Information Center ICWC, 84 p. (In Russian).

6 Matyugin M.A., Miltsyn D.A., 2015. *Sovremennye pribory i metody izmereniya raskhoda vody v otkrytykh vodotokakh* [Modern devices and methods for measuring water flow in open watercourses]. *Vestnik Volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta* [Bull. of Volga State Academy of Water Transport], no. 44, pp. 66-76. (In Russian).

7 *Kak vybrat' raskhodomer dlya samoteknykh kanalov po tsene i kachestvu* [How to choose a flow meter for gravity canals in terms of price and quality], available: <https://vistaros.ru/stati/rasho-domeryi/kak-vybrat-schyotchik-stochnyh-vod.html/> [accessed 2020]. (In Russian).

8 Savenkov A.V., 2016. *K voprosu o perspektivnosti ul'trazvukovogo metoda izmereniya urovnya zhidkosti* [On the prospect of the ultrasonic method for measuring the liquid level]. *Prioritetnye nauchnye napravleniya: ot teorii k praktike* [Priority Research Areas: From Theory to Practice], no. 32-1, pp. 187-191. (In Russian).

9 Egorov N.L., Loytsker O.D., Shafranovskiy M.N., 2016. *Izmereniye raskhoda zhidkosti s pomoshch'yu lotkov Venturi pri svobodnom i zatoplennom istechenii* [Liquid flow rate measurement using Venturi trays with free and flooded outflow]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* [Water Supply and Sanitary Engineering], no. 1, pp. 66-71. (In Russian).

10 Konev A.V., 2019. *Izmerenie raskhoda zhidkosti v beznapornykh potokakh. Analiz sovremennykh metodov* [Measurement of liquid flow rate in free-flow streams. Analysis of modern methods]. *Zhurnal "ISUP"* [Journal "ISUP"], no. 3(81), pp. 49-54. (In Russian).

11 Savenkov A.V., Pershenkov P.P., 2016. *K voprosu o pogreshnosti izmereniya urovnya zhidkosti ul'trazvukom* [On issue of the error in measuring the liquid level by ultrasound]. *Actualscience*, vol. 2, no. 10, pp. 91-92. (In Russian).

12 Emelyanov V.A., Dashin E.V., 2011. *Pribornyy uchet raskhoda ochishchennykh stochnykh vod* [Instrument metering of treated wastewater flow]. *Mir izmereniy* [World of Measurements], no. 10, pp. 14-17. (In Russian).

13 Khaziev I.L., Ustinova E.S., Glushchenko A.G., Glushchenko E.P., 2014. *Effekt Doplera v neravnomerno dvizhushchikhsya strukturakh* [The Doppler effect in unevenly moving structures]. *Sovremennye naukoymkie tekhnologii* [Modern Science-Intensive Technologies], no. 5, pp. 125-128. (In Russian).

14 Davydov V.V., Kruzhalov S.V., Vologdin V.A., 2017. *O nekotorykh osobennostyakh issledovaniya potoka zhidkikh sred metodom Doplera* [On some features of the study of the flow of liquid media by the Doppler method]. *Opticheskiy zhurnal* [Optical Journal], vol. 84, no. 8, pp. 77-83. (In Russian).

15 Johnson D., 2002. Ultrasonic flowmeters: a 'sound' technology. *Control Engineering*, vol. 10, pp. 33-38.

16 Sklyarenko M.S., 2015. *Otsenka tochnosti metodov trekinga dlya opredeleniya 2D-koordinat i skorostey mekhanicheskikh sistem po dannym tsifrovoy fotos"emki* [Accuracy estimation of object tracking methods for identification of 2D-coordinates and velocities of mechanical systems based on digital photography data]. *Komp'yuternaya optika* [Computer Optics], vol. 39, no. 1, pp. 125-135. (In Russian).

17 Gorne Yu.V., 2018. *Vybor raskhodomerov dlya samotekhnicheskikh kanalov* [Choice of flow meters for gravity channels]. *Santekhnika* [Plumbing], vol. 5, no. 5, pp. 44-49. (In Russian).

18 *Kross-korrelyatsionnye pribory ucheta (raskhodometry) stochnykh vod Nivus dlya samotekhnicheskikh kanalov, napornykh i beznapornykh truboprovodov* [Cross-correlation metering devices (flow meters) of waste water Nivus for gravity canals, pressure and non-pressure pipelines], available: <https://vistaros.ru/stati/rashodomeryi/kross-korrelyatsionnye-pribory-ucheta-rashodomeryi-stochnykh-vod-nivus-dlya-samotekhnicheskikh-kanalov-napornykh-i-beznapornykh-truboprovodov.html> [accessed 2020]. (In Russian).

19 Talulaev S.G., 2012. *Analiz ul'trazvukovykh metodov izmereniya raskhoda zhidkosti* [Analysis of ultrasonic methods for measuring liquid flow]. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* [Models, Systems, Networks in Economics, Technology, Nature and Society], no. 1(2), pp. 157-159. (In Russian).

20 Nikitin E.G., Syrchin V.K., 2019. *Primenenie korrelyatsionnogo metoda dlya izmereniya raskhoda zhidkosti v ul'trazvukovykh raskhodomerakh* [Application of the correlation method for measuring the flow rate of liquid in ultrasonic flow meters]. *Intellektual'nye sistemy i mikrosistemnaya tekhnika: materialy nauch.-prakt. konf.* [Intelligent Systems and Microsystem Technology: Proc. of Scientific Practical Conf.]. Scientific Research "MIET", Moscow, pp. 112-120. (In Russian).

21 Chizhov N.S., 2017. *Realizatsiya ul'trazvukovogo raskhodomera vody na osnove vremya-impul'snogo metoda* [Implementation of an ultrasonic water flow meter based on the time-pulse method]. *Nauka, tekhnika i obrazovanie* [Science, Technology and Education], no. 4(34), pp. 65-69. (In Russian).

22 Kanaev A.N., Polyakov A.I., Novikov M.G., 2008. *K voprosu izmereniya raskhodov vody v truboprovodakh bol'shikh diametrov* [On the issue of measuring water flow rates in large-diameter pipelines]. *Vodoochistka, vodopodgotovka, vodosnabzheniye* [Water Purification, Water Treatment, Water Supply], no. 11(11), pp. 10-14. (In Russian).

23 Rajita G., Mandal N., 2016. Review on transit time ultrasonic flowmeter. 2nd Interna-

Васильченко Аркадий Павлович

Ученая степень: кандидат технических наук

Должность: научный сотрудник

Место работы: федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации»

Адрес организации: Баклановский пр-т, 190, г. Новочеркасск, Ростовская область, Российская Федерация, 346421

E-mail: Vap79@mail.ru

Vasilchenko Arkadiy Pavlovich

Degree: Candidate of Technical Sciences

Position: Researcher

Affiliation: Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems

Affiliation address: Baklanovsky ave., 190, Novocherkassk, Rostov region, Russian Federation, 346421

E-mail: Vap79@mail.ru

Кореновский Александр Михайлович

Должность: научный сотрудник

Место работы: федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации»

Адрес организации: Баклановский пр-т, 190, г. Новочеркасск, Ростовская область, Российская Федерация, 346421

E-mail: koren-24@yandex.ru

Korenovskiy Aleksandr Mikhaylovich

Position: Researcher

Affiliation: Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems

Affiliation address: Baklanovsky ave., 190, Novocherkassk, Rostov region, Russian Federation, 346421

E-mail: koren-24@yandex.ru

Поступила в редакцию 08.10.2020

После доработки 23.11.2020

Принята к публикации 27.11. 2020