

АКУСТИЧЕСКИЙ УРОВНЕМЕР-РАСХОДОМЕР ДЛЯ КОНТРОЛЯ РАСХОДА ЖИДКОСТИ В БЕЗНАПОРНЫХ ВОДОВОДАХ

Введение

Учет сточных вод – одна из наиболее актуальных проблем системы коммунального хозяйства. Большинство эксплуатирующихся самотечных канализационных коллекторов и каналов не оборудованы узлами учета, что приводит к необходимости использовать косвенные данные как при расчетах между субъектами хозяйственной деятельности за очистку стоков, так и при определении затрат очистных сооружений по их переработке.

Из-за отсутствия средств учета наибольшее распространение получил пропорциональный метод подсчета, связывающий объем сточных вод (водоотведение) с объемом водопотребления. Однако часть потребляемой воды может расходоваться на непроизводственные нужды (полив территории предприятия, аварии в водопроводной сети и др.) и не попадать в канализацию. Как показывает опыт, учет сточных вод позволяет потребителю получить экономии до 20 % средств [1].

Для очистных сооружений объем поступающих сточных вод может превышать объем водопотребления за счет атмосферных осадков, поступающих в канализационную сеть по ливневым водостокам [2]. Для потребителей этот дополнительный объем принято учитывать по данным о площади предприятия и объему выпавших или среднемесячных осадков.

Поэтому организация реального учета сточных вод представляет актуальную задачу для потребителей и для предприятий очистных сооружений.

В системах канализации сточные воды транспортируют по напорным или безнапорным трубопроводам. В первом случае вода движется под давлением, а во втором идет по трубам «самотеком». Задача измерения объема жидкости в напорных трубопроводах достаточно хорошо отработана [3]. Учет расхода в безнапорных лотках и трубопроводах, где вода течет под действием силы тяжести, представляет более сложную задачу.

В настоящее время используются несколько методов определения расхода жидкости в безнапорных лотках и трубопроводах, основанных только на информации о строительных параметрах водоводов, базирующихся на результатах измерения текущего уровня потока в эталонных лотках, а также одновременного измерения уровня и скорости потока.

В работе рассматривается возможность контроля расхода жидкости в безнапорных лотках и трубопроводах с помощью акустического уровнемера-расходомера, обеспечивающего синхронное измерение текущих уровня и скорости потока.

Методы определения расхода в безнапорных водоводах

В настоящее время определение расхода жидкости Q в безнапорных водоводах выполняют методом «уровень – расход» по данным измерения уровня, типа водовода и его геометрических размеров.

При равномерном течении жидкости в прямолинейном призматическом водоводе расход описывается формулой Шези [4, 5]

$$Q = \omega C(RI)^{1/2}, \quad (1)$$

где ω – площадь поперечного сечения потока жидкости в водоводе; R – гидравлический радиус; C – коэффициент Шези; I – гидравлический уклон.

Основной исходной информацией для расчета величины расхода с помощью выражения (1), помимо уровня жидкости, являются проектные данные о форме и размерах сечения водовода, строительном уклоне и коэффициенте шероховатости стенок. В связи с тем, что проектные данные практически всегда отличаются от фактических, а коэффициент шерохо-

ватости изменяется в процессе эксплуатации, то для расчета текущего расхода Q_i используют выражение [5]

$$Q_i = \omega_i V_{cp}, \quad (2)$$

где ω_i – площадь текущего (смоченного) сечения жидкости, рассчитываемая по измеряемому уровню жидкости типу лотка (трубопровода) и его геометрическим размерам, а V_{cp} – средняя скорость жидкости в сечении ω_i .

Для определения средней скорости потока V_{cp} могут использоваться [2]:

- расчетный метод, основанный на проектных данных водостока (формула Шеши);
- полуэмпирические формулы пересчета «уровень – средняя скорость потока» для калиброванных сечений водоводов, в качестве которых применяют лотки Вентури и Паршалля, размеры которых стандартизованы;
- метод одновременного измерения уровня и скорости потока для фиксированного расположения датчика скорости.

С целью реализации первого метода были разработаны специальные таблицы [5], позволяющие определять скорость потока по проектным данным водостока. Данный метод может быть реализован на существующих водоводах без строительства дополнительных гидротехнических узлов. Однако, несмотря на универсальность, он характеризуется наибольшей погрешностью из-за возможного отличия реальных параметров водовода (в первую очередь уклона) от проектных, а также временного изменения коэффициента шероховатости стенок.

Второй метод требует изготовления, аттестации и установки в реальном водоводе эталонного лотка. Он характеризуется меньшей погрешностью, для реализации которой необходимо поддержание в процессе эксплуатации первоначальных параметров эталонного лотка. Метод реализуется, например, на базе расходомеров ЭХО-Р-01/02 [1,4].

Метод «уровень – скорость» является наиболее перспективным, так как контроль скорости потока позволяет получать дополнительную информацию о фактическом состоянии водовода. Кроме того, его реализация не требует строительства дополнительных сооружений. Однако данный метод требует начальной калибровки водовода путем измерения высотного профиля скорости жидкости, с помощью которого в дальнейшем рассчитывают величину средней или максимальной скорости потока для текущего уровня.

Начальная калибровка проводится в рамках специальной методики [6] с помощью гидрометрических вертушек или электромагнитных измерителей скорости потока, устанавливаемых на мерной штанге. В процессе эксплуатации расходомера контроль скорости осуществляется с помощью ультразвуковых доплеровских измерителей скорости, устанавливаемых как над поверхностью жидкости, так и внутри потока [4]. Недостатком датчиков скорости данного типа является зависимость погрешности измерения от величины уровня, наличия пены и волнения на поверхности жидкости.

Таким образом, данный метод является наиболее эффективным способом измерения параметров потока. Его основной недостаток заключается в необходимости синхронного использования двух отдельных приборов: уровнемера и измерителя скорости потока, что требует применения специальных по синхронизации функционирования обоих приборов, а также увеличивает стоимость расходомера.

Уровнемер – расходомер

В [7] было предложено устройство для синхронного измерения уровня и скорости потока жидкости в безнапорных лотках и трубопроводах, разработанного на базе уровнемера с плоской акустической волной [8]. Структурная схема макета уровнемера-расходомера для проведения натурных испытаний на базе [7] представлена на рис.1, а временные диаграммы, поясняющие его функционирование, – на рис.2.

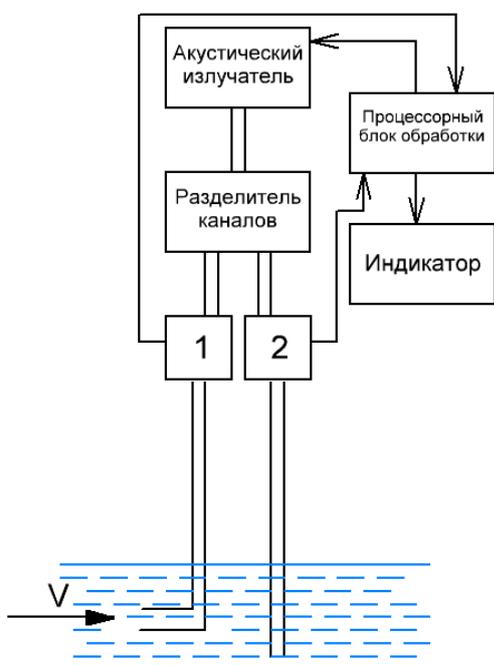


Рис. 1

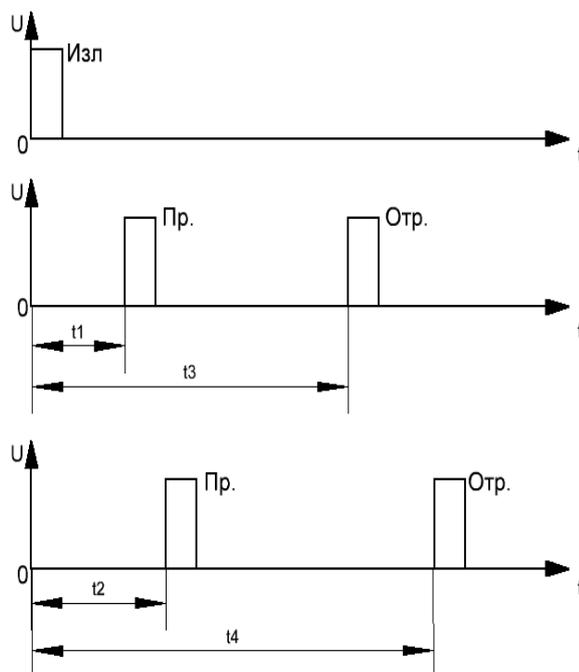


Рис. 2

Уровнемер-расходомер (см. рис. 1) работает следующим образом. После включения питания процессорный блок обработки инициализируется и вырабатывает зондирующий видеосигнал запуска (Изн) акустического излучателя (см. рис. 2). Последний преобразует зондирующий видеосигнал в излучаемый акустический сигнал, который по звуководу поступает на разделитель каналов, где разделяется на два зондирующих акустических сигнала, поступающих в звуководы датчиков скорости (трубка Пито) и уровня.

Зондирующий акустический сигнал по звуководу датчика скорости достигает плоскости установки приемника 1 и на его выходе вырабатывается сигнал (Пр1), поступающий на первый вход процессорного блока обработки, в котором вычисляется величина интервала t_1 . Одновременно зондирующий сигнал, следуя по звуководу датчика уровня, достигает плоскости установки приемника 2 и на его выходе вырабатывается сигнал (Пр2), поступающий на второй вход процессорного блока обработки, в котором вычисляется величина интервала t_2 .

Зондирующий акустический сигнал по звуководу датчика скорости достигает поверхности жидкости, отражается от нее и через временной интервал t_3 поступает на вход приемника 1. На его выходе вырабатывается сигнал (Отр1), который снова поступает на первый вход процессорного блока обработки, в котором вычисляется величина интервала t_3 . Аналогично вычисляется интервал t_4 для момента прихода отраженного сигнала (Отр2) в звуковод датчика уровня.

В процессорном блоке обработки на основании временных интервалов t_1 , t_2 , t_3 и t_4 производится вычисление расстояния до поверхности жидкости в канале датчика уровня $R = C(t_4 - t_2)/2$, где C – скорость акустической волны, а также разности расстояний до поверхности жидкости в звуководах датчиков уровня и скорости $\Delta R = C[(t_4 - t_2) - (t_3 - t_1)]/2$.

Результаты вычисления R и ΔR поступают на индикатор, а их величины в дальнейшем используются для определения уровня и скорости потока в точке установки трубки Пито и последующей оценки текущего расхода.

Результаты натурной апробации

Испытания уровнемера-расходомера были проведены на реальном канале входного водовода городских очистных сооружений, в который жидкость поступала после ее механической очистки. Основная задача натурных испытаний заключалась в установлении возмож-

ности определения текущего расхода с помощью устройства [7], обеспечивающего синхронное измерение уровня и скорости потока.

Выбранный для проведения испытаний канал водовода имел прямоугольное сечение шириной $B = 1,5\text{ м}$ и максимальный уровень $H_{\text{макс}} = 2\text{ м}$. Сверху канал водовода был накрыт бетонными плитами. Между двумя плитами, расположенными на расстоянии около 6 м от плоскости разделения основного потока на два идентичных канала, находился просвет, через который имелась возможность введения в поток жидкости звуковедущих труб датчиков уровня и скорости.

В соответствии с рекомендацией [6] звуковедущая труба датчика скорости была вертикально установлена на расстоянии $1/3B \approx 0,5\text{ м}$ от правой стенки канала с ориентацией трубки Пито навстречу потоку. Звуковод датчика уровня располагался ближе к центру канала на расстоянии около 20 см от звуковода датчика скорости. Очевидно, что поток жидкости в выбранном месте установки датчиков не являлся установившимся, так как протяженность прямолинейного участка ($\approx 6\text{ м}$) от плоскости разделения потока на два канала было меньше требуемого $20H_{\text{макс}} \approx 40\text{ м}$ [2]. Буруны и пена на поверхности жидкости визуально подтверждали, что поток не является установившимся, однако выполнить требуемое условие не было возможности, так как через 5-6 м после места установки уровнемера-расходомера, что также менее требуемых $10H_{\text{макс}} \approx 20\text{ м}$ [2], канал изменял направление и уходил под землю.

После установки и фиксации труб датчиков уровня и скорости в потоке было установлено, что расстояние от верхней плоскости плиты перекрытия до дна канала составляет 2,48 м, а текущий уровень жидкости – около 80 см. В процессе измерений на индикаторе наблюдались флуктуации величин расстояния R до поверхности жидкости и разности расстояний ΔR , достигавшие 15 – 25 см. Наличие флуктуаций R и ΔR подтверждало, что поток жидкости не являлся ламинарным как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях. Поэтому экспериментальные данные могли использоваться только для оценки текущих величин уровня, скорости потока и расхода жидкости.

Фактические длины труб датчиков обеспечивали возможность оценки скорости потока в диапазоне высот y датчика скорости от 40 до 77 см над дном водовода. С этой целью для выбранных высот y датчика скорости по измеренным ΔR определялись их среднеарифметические величины $\Delta R_{\text{ср}}$, по которым рассчитывались величины текущей скорости потока V и их среднеарифметические значения $V_{\text{ср}} = (2g\Delta R_{\text{ср}})^{0,5}$ [9], где $g \approx 9,8\text{ м/с}^2$. Результаты натуральных измерений представлены в таблице.

y , см	ΔR , см	$\Delta R_{\text{ср}}$, см	V , м/с	$V_{\text{ср}}$, м/с
40	6 – 17	11,5	1,08 – 1,82	1,45
51	7 – 30	18,5	1,17 – 2,42	1,75
71,5	7 – 34	20,5	1,17 – 2,58	1,88
77	7 – 32	19,5	1,17 – 2,54	1,86

По среднеарифметическим данным $\Delta R_{\text{ср}}$ таблицы был построен высотный профиль среднеарифметических значений скорости потока (см. рис. 3), в который было введено дополнительное значение скорости ($V \approx 0$) у дна водовода. Сплошной линией на рис. 3 нанесена функция, аппроксимирующая среднеарифметические данные $V_{\text{ср}}$ таблицы.

Оценка текущего расхода

Чтобы оценить величину текущего расхода жидкости с помощью выражения (2), была определена средняя скорость потока $V_{\text{ср}}$. Согласно [6], ордината высоты $V_{\text{ср}}$ для прямоугольного сечения водовода рассчитывается с помощью выражения

$$y_{\text{ср}} = 0,414 R_{\text{отн}} H_{\text{макс}} . \quad (3)$$

Для текущего уровня $H_i = 0,8\text{ м}$ и $H_{\text{макс}} = 2\text{ м}$, согласно данным таблицы ПА.3 [6],

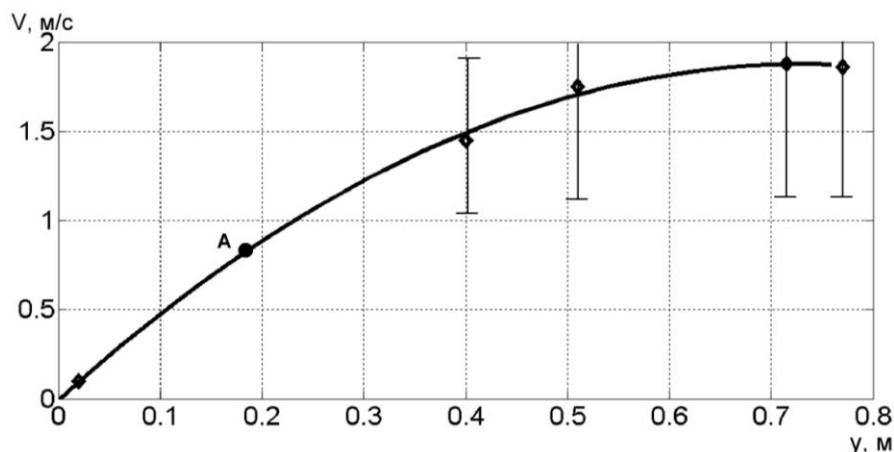


Рис. 3

$R_{\text{отн}} = 0,193545$, а $\omega_{\text{отн}} = 0,399996$. В этом случае ордината высоты средней скорости составляла $y_{\text{ср}} \approx 0,16\text{ м}$, а величина средней скорости потока — $V_{\text{ср}} \approx 0,72\text{ м/с}$ (см. точку А на рис. 3).

На основании (2) текущий расход во время проведения испытаний составлял

$$Q_i = \omega_i V_{\text{ср}} = \omega_{\text{отн}} B H_{\text{макс}} V_{\text{ср}} \approx 0,146\text{ м}^3/\text{с},$$

где $\omega_i = \omega_{\text{отн}} B H_{\text{макс}}$ — для прямоугольного сечения водовода [6].

Выводы

Результаты натурной апробации макета уровнемера-расходомера свидетельствуют:

- акустический уровнемер-расходомер обеспечивает возможность измерения высотного профиля скорости в безнапорных водоводах;
- данные одновременного контроля уровня и скорости потока являются достаточными для последующего расчета текущего расхода жидкости;
- использование акустического уровнемера-расходомера представляет интерес для оценки расхода на существующих водоводах при нестационарных потоках после проведения дополнительных исследований.

Список литературы: 1. Шафрановский М.Н., Озеров А.В. Средства учета в системах канализации. Три метода измерения расхода сточных вод // Водоснабжение и санитарная техника. — 1999. — № 4. 2. Анисимов Д.Л. Учет сточных вод: общие сведения о методах и приборах. Коммерческий учет энергоносителей // Труды 26-й Междунар. науч.-практ. конф. — СПб. : Борей-Арт, 2007. — С.236. 3. Мясников В.И. Ультразвуковые методы измерения расхода жидкости // Мир измерений. — 2004. — № 1. — С. 9. 4. Озеров А.В., Шафрановский М.Н., Мордясов М.А. Методические вопросы калибровки безнапорных водоводов // Водоснабжение и санитарная техника. — 2003, №3. 5. Лукиных А. А., Лукиных Н. А. Таблицы для гидравлического расчета канализационных сетей и дюкеров по формуле акад. Н. Н. Павловского — Павловского. Изд. 4-е, доп. — М. : Стройиздат, 1974. — 156 с. 6. Расход и объем сточной жидкости. Методика измерений в безнапорных водоводах по уровню заполнения с предварительной калибровкой измерительного створа (МИ 2220-13). — М., 2013. — 67с. 7. Жуков Б.В., Одноволов А.В., Борбульов С.Л., Сосновчик Д.М. Патент на корисну модель № 82450. Пристрій для вимірювання об'ємної витрати рідини у відкритих каналах і закритих трубопроводах без напору. 12.08.2013. 8. Жуков Б.В., Одноволов А.В. Акустический уровнемер с высокой разрешающей способностью для контроля жидких сред // Радиотехника. — 2013. — №173. — С. 158. 9. Ермолаев Г.Г., Андронов Л.П. Морское судовождение. — М. : Транспорт, 1970. — 375 с.

Институт радиофизики и электроники
НАН Украины

Поступила в редколлегию 22.02.2016