

На правах рукописи

Романова Наталья Львовна

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ
ИЗМЕРЕНИЙ И УЧЕТА ОБЪЕМА ВОДЫ В СИСТЕМАХ
ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ**

Специальность

**05. 11. 01 Приборы и методы измерений по видам измерений
(механические величины)**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург

2010

Работа выполнена в ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга», ЗАО «Водоканал – Центр Измерений» совместно с Всероссийским научно-исследовательским институтом метрологии им. Д.И. Менделеева

Научный руководитель:

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник

Захаренко Ю. Г.

Научный консультант:

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник

Чистяков Ю. А.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук
старший научный сотрудник

Шумилин В. П.

кандидат технических наук,
доцент

Кучерявенко Е. П.

Ведущее предприятие:

ЗАО «Взлет»

Защита диссертации состоится 17 мая 2010 года в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 308.004.01. при ВНИИМ им. Д. И. Менделеева по адресу: Санкт-Петербург, Московский пр., д. 19.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ВНИИМ им. Д. И. Менделеева.

Автореферат разослан «___» _____ 2010 года

Ученый секретарь

к.т.н., доцент _____ Г. П. Телитченко

Общая характеристика работы.

Актуальность темы

Актуальность измерения объемов воды резко возрастает, начиная с 90-х гг. прошлого столетия. Эти годы характерны началом массовой установки средств измерений, резким изменением режимов водопотребления в связи с сокращением производства, отсутствием метрологического обеспечения существовавшего на тот момент парка приборов (сужающие устройства (СУ), электромагнитный расходомер «Индукция», проливные стенды завода «Ленводоприбор» ограниченного применения), а полученные результаты измерений не были положительными вследствие недостаточного знания реальных параметров измеряемой среды и, практически, неприменимого согласования условий измерения и допусков на условия применения средств измерения.

В отличие от существующей системы измерений расходов и объемов воды требовалось исследовать параметры воды, как многофазной среды: водовоздушной с включениями твердых фаз при нестационарном характере движения потока; разработать новые узлы измерений и учета на основе сертифицированных, отечественных и импортных приборов и устройств; обеспечить получение результатов измерения в реальных условиях эксплуатации аттестованными методиками выполнения измерения; обеспечить неподлежащие демонтажу средства измерений метрологическим обеспечением в условиях эксплуатации, не нарушая технологического цикла; разработать требования для метрологического обеспечения узлов больших диаметров (300-1500 мм), где пока нет проливных стендов, а поверка за границей крайне дорога и потому нецелесообразна.

Условия эксплуатации оказывают влияние на измеряемую величину и параметры применяемых средств измерений. Среди условий, влияющих на результат измерений, необходимо отметить аэрацию жидкости, пульсацию измеряемого расхода в реальных условиях, «зарастание» стенок трубопровода и др.

Известно немало примеров, каким образом эти условия влияют на результат измерения расхода и количества воды. Селиванов М. Н., Фридман А. Э., Кудряшова Ж. Ф. в работе «Качество измерений» считают, что последствия, связанные с неучетом условий эксплуатации средств измерений, приводят к тому, что доля недостоверных значений измерений по этой причине составляет 46 %.

Для производства воды измерительная информация об объемах и расходах воды должна быть достоверной, а обеспечение достоверности должно достигаться в широком диапазоне диаметров водоводов и скоростей потока воды.

Решение этой задачи требует создания соответствующих специализированных средств измерений, разработка которых должна базироваться на обоснованных взаимосогласованных технологических требованиях.

Исходя из этого, необходимо: проведение анализа фактической природы формирования сигнала, соответствующей расходу и объему воды, исследование составляющих методической погрешности измерения, исследование составляющих инструментальной погрешности измерения.

Основной целью работы является разработка требований и принципов построения средств измерений; исследование метода измерений, создание и исследование средств измерений (узлов) расхода и объема воды, и методик выполнения измерений в реальных условиях эксплуатации.

Достижение этой цели заложит основу системы измерений, учета и сведения балансов воды с меньшей погрешностью при производстве, водоотведении и очистке воды.

Научная новизна работы состоит в том, что:

- уточнены основные источники погрешностей измерения расхода и объема воды в условиях эксплуатации;
- получены аналитические выражения и числовые значения погрешностей измерения, обусловленные спецификой технологического процесса;
- разработаны новые способы измерения расхода и объема воды в условиях эксплуатации,
- созданы и исследованы узлы учета, основанные на разработанных автором способах измерения расхода и объема воды;
- разработаны принципы коррекции систематических погрешностей узлов учета для работы в условиях помех.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты анализа погрешностей измерения расхода и объема воды и его особенности применительно к условиям эксплуатации ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга (СПб)», которые позволили выбрать методы измерения и способ построения системы учета с наименьшими погрешностями измерения.

2. Способы измерения расхода и объема:

- воды в скрытых протяженных трубопроводах большого диаметра с малой скоростью потока, таких, как в находящихся в эксплуатации дюкерных переходах,
- многофазной жидкости в условиях пульсирующего потока.

3. Метод коррекции результатов измерения расхода и объема воды в условиях эксплуатации.

4. Способ определения неучтенного объема воды.

5. Новые схемные и конструктивные решения, позволившие создать систему учета воды с оптимальными параметрами, с наименьшими погрешностями в условиях эксплуатации, с существенным экономическим эффектом.

6. Результаты экспериментальных исследований, разработанных узлов измерения и учета объемов воды, адаптированных к конкретным условиям эксплуатации.

Практическая значимость работы состоит в том, что:

- разработаны методические решения, позволяющие уменьшить случайные и систематические погрешности существующих и вновь разрабатываемых средств измерения,
- разработаны новые способы измерения расхода и объема воды в условиях эксплуатации;
- разработана методика определения объема воды, неучтенного во время возникновения нештатных ситуаций;
- разработаны новые схемные и конструктивные решения узлов измерений и учета воды
- создана система учета воды с оптимальными параметрами, с наименьшими погрешностями в условиях эксплуатации, с существенным экономическим эффектом.

Личный вклад автора.

- проведено теоретическое исследование методических составляющих погрешности от влияющих величин и экспериментальное исследование инструментальных погрешностей средств измерения расхода и объема воды и параметров водного потока.
- разработан способ измерения расхода воды в скрытых протяженных трубопроводах большого диаметра с малой скоростью потока, таких, как в находящихся в эксплуатации дюкерных переходах.
- разработан способ измерения расхода и объема многофазной жидкости в условиях пульсирующего потока.
- разработаны способ определения неучтенного объема и методика определения фактического объема водопотребления и водоотведения.
- разработана методика определения влияния величины отложений на внутренней поверхности трубопровода на результат измерения ультразвуковых расходомеров-счетчиков.
- разработана техническая и конструкторская документация узлов измерений и учета.
- создана система учета воды с оптимальными параметрами, с наименьшими погрешностями в условиях эксплуатации.

Полученные результаты внедрены:

- при проектировании 91 узла учета для многофазных потоков на базе ультразвуковых и электромагнитных расходомеров,

- при расчете объемов фактического водопотребления филиалов ГУП «Водоканал СПб» и его абонентов, в том числе при расчете объемов воды во время возникновения нештатных ситуаций.

Апробация. Основные положения диссертации обсуждались на:

- 19-21, 24, 26 и 27 международных научно-практических конференциях «Коммерческий учет энергоносителей», 2004, 2005, 2006, 2007, 2008;
- симпозиумах «Мир измерений и учета», 2004, 2005 ,
- 1 международном конгрессе «ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ. XXI ВЕК. Инженерные методы снижения энергопотребления зданий», 2009.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 работ, из них 3 патента и 2 работы в рецензируемом ВАК ведущем научном журнале: «Водоснабжение и санитарная техника».

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложений.

Диссертация содержит 149 стр., 43 рис., 1 фиг., 13 таблиц в основном тексте и 51 стр. в Приложениях.

Диссертация написана по материалам исследований, выполненных в ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга», ЗАО «Водоканал – Центр Измерений» совместно с Всероссийским научно-исследовательским институтом метрологии им. Д.И. Менделеева в период 2002-2009 гг.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель работы. Описана структура диссертации, положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрено состояние техники измерений; приводится критический анализ применяемых методов и средств измерения по опубликованным материалам. Анализ предшествуют сведения о природе и физике образования информации о параметрах водных потоков, водоводах, дана оценка величины источников сигнала и помех.

Краткая характеристика методов измерения, обзор и анализ существующей аппаратуры позволили определить перспективное направление поиска решения. Магистральным направлением измерения расхода многофазных сред является предварительная подготовка самого потока, состоящая в разделении фаз, либо в гомогенизации потока, т. е. выравнивании скоростей движения фаз.

Незнание реальных параметров водного потока (наличие нескольких фаз, нестационарность и т. д.) является одной из причин дисбаланса между результатами измерения количества поставленной и полученной воды. После выполнения измерений, результаты необходимо подвергать математической и логической обработке. Измерительные и процедурные функции целесообразно разделить, и документировать. Основой организации учета являются

результаты достоверных измерений и, в соответствии с этим, главным направлением работы являются:

- выявление и исследование факторов, влияющих на результат измерения,
- определение характера влияющего фактора и нахождение способа исключения или уменьшения степени влияния на результат измерения.

Во второй главе выполнены теоретические исследования метода измерения и источников искажения измерительной информации, а также составляющих погрешности результата измерения расхода; дана оценка помехам и способам коррекции; получены аналитические выражения для перевода результатов измерений в нормальных условиях к результатам измерений параметров многофазных нестационарных потоков в условиях эксплуатации, дана оценка воздействия влияющим факторам на средства измерений, использующие различные физические принципы действия, проведен анализ физической природы образования искажения измерительной информации с целью поиска способов их исключения, уменьшения или учета.

Результаты измерения зависят как от неточности самих преобразователей, так и от их чувствительности к помехам, а также от величины этих помех. Измерительную систему необходимо построить так, чтобы достигались согласованные характеристики средств измерений и условий эксплуатации, а также уменьшить систематическую часть погрешности при помощи различных способов коррекции. Система должна быть как можно более чувствительной к измеряемой величине и как можно менее чувствительной к величине помех.

Модель процесса образования погрешности результата измерения включает в себя следующие основные составляющие: погрешность фона, погрешность метода, инструментальную погрешность, погрешность регистрации.

В воде, подаваемой по напорным водоводам, всегда содержится некоторое количество воздуха, причем объем нерастворенного воздуха по длине водовода постоянно меняется, так как в зависимости от давления в трубах и температуры воды он сжимается или расширяется, растворяется в воде или наоборот выделяется из воды. Относительное количество (объем) воздуха, которое может раствориться в рабочей жидкости до ее насыщения, прямо пропорциональное давлению на поверхности раздела жидкость-воздух, можно вычислить по формуле

$$V_{рв} = KV_{рж} p_i/p_o,$$

где $V_{рв}$ - объем растворенного воздуха, отнесенный к нормальным условиям ($p_o = 0,101325$ МПа (1 атм), $T_o = 293$ К), $дм^3$,

K – коэффициент растворимости воздуха в рабочей жидкости,

$V_{рж}$ - объем жидкостно-воздушной смеси, $дм^3$,

p_o и p_i – начальное и конечное давление воздуха, находящегося в контакте с водой. Объем смеси:

$$V_{рж} = V_{ж} + V_{рв} + V_{нв} ,$$

где $V_{ж}$ – объем “чистой” (дегазированной) жидкости, не содержащей растворенный и нерастворенный воздух (можно получить только глубоким вакуумированием),

$V_{нв}$ – объем нерастворенного воздуха, приведенный к нормальным условиям ($p_0 = 1 \text{ атм}$, $T_0 = 293 \text{ К}$), дм^3 .

Экспериментальными исследованиями установлено, что растворенный воздух практически не влияет на плотность ρ и модуль упругости рабочей жидкости, тогда как влиянием нерастворенного воздуха на эти параметры пренебречь нельзя.

Отметим некоторые особенности измерения двухфазных сред на примере СУ.

Уравнение при движении некоторой массы M_c двухфазного вещества через СУ, установленное на горизонтальном участке трубопровода для однофазных сред:

$$Vp_1 + M_c \frac{v_1^2}{2} = Vp_2 + M_{л} \frac{v_{2л}^2}{2} + M_{т} \frac{v_{2т}^2}{2},$$

где p_1 и p_2 – статические давления соответственно в сечениях I-I и II-II (рис.1);

$M_c, M_{л}, M_{т}$ – масса смеси, легкой и тяжелой фаз;

V – объем смеси;

v_1 – средняя скорость смеси в сечении I-I;

$v_{2л}, v_{2т}$ – средняя скорость легкой и тяжелой фаз в сечении II-II.

Вторым исходным уравнением будет уравнение неразрывности потока

$$q_M = \rho_c F_1 v_1 = \rho_{л} F_{2л} v_{2л} + \rho_{т} F_{2т} v_{2т},$$

где q_M – массовый расход двухфазного вещества;

$\rho_c, \rho_{л}, \rho_{т}$ – плотность смеси, легкой и тяжелой фаз;

F_1 – площадь поперечного сечения трубы;

$F_{2л}, F_{2т}$ – площади в сечении II-II, занятые легкой и тяжелой фазой.

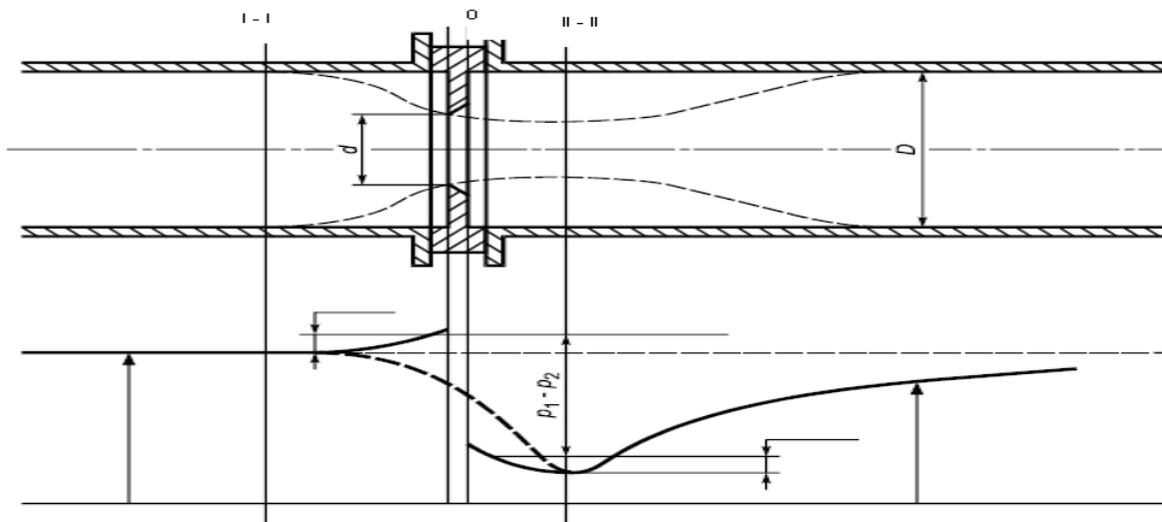


Рис. 1

Преобразуя исходные уравнения, умножая на поправочный множитель ε , учитывающий уменьшение плотности вещества при проходе через СУ, и на коэффициент сопротивления ξ на участке от I-I до II-II, учитывающий потери энергии, а также неравномерность скоростей и местоположение отверстий для отбора давлений, получим искомое уравнение расхода для двухфазного потока в виде

$$q_M = \frac{\mu \xi \varepsilon \frac{c}{b}}{\sqrt{\left(1 - \mu^2 m^2 \frac{c^2}{b^2}\right) - \eta_{T_M} \left(1 - z^2 \mu^2 m^2 \frac{c^2}{b^2}\right)}} F_0 \sqrt{2\rho_c (p_1 - p_2)},$$

где μ - коэффициент сужения струи, отнесенный к скорости в сечении II-II.

Если принять скорость $v_{2_T} = v_{2_L}$ и положить в этом уравнении $z = \frac{b}{\mu t c}$, то из него, как частный случай, получится уравнение расхода для однофазной среды

$$q_M = \alpha \varepsilon F_0 \sqrt{2\rho_c (p_1 - p_2)},$$

где $\alpha = \mu \xi / \sqrt{1 - \mu^2 m^2}$ - коэффициент расхода.

При измерении расхода многофазных сред, например, сточной воды нередко возникают очень большие трудности, зависящие как от процентного содержания отдельных фаз и характера их распределения в потоке. Такая среда не имеет гомогенной структуры и характеризуется непрерывным изменением концентрации фаз по длине трубы. Измерение мгновенного расхода такой смеси имеет небольшое практическое значение. Лишь среднее значение расхода за некоторый интервал времени может правильно характеризовать такой поток. Минимальный интервал осреднения T_0 зависит от структуры потока и может достигать в некоторых случаях 90-100 с. При этом надо иметь в виду, что средняя скорость более тяжелой фазы меньше средней скорости более легкой фазы. Поэтому возникает необходимость различать истинную и расходную концентрацию обеих фаз.

Истинной концентрацией одного из компонентов, например тяжелого, является отношение объема V_T или массы $M_T = V_T \rho_T$ этого компонента к общему объему $V_c = V_T + V_L$ или общей массе $M_c = V_T \rho_T + V_L \rho_L$ смеси соответственно в отрезке трубы длиной L .

Тогда при постоянстве концентрации компонентов истинная объемная η_{T_0} и массовая η_{T_M} концентрации тяжелого компонента будут определяться уравнениями:

$$\eta_{T_0} = \frac{V_T}{V_c} = \frac{F_T L}{(F_T + F_L)L} = \frac{F_T}{F} \quad \text{и} \quad \eta_{T_M} = \frac{V_T \rho_T}{V_T \rho_T + V_L \rho_L} = \frac{F_T \rho_T L}{(F_T \rho_T + F_L \rho_L)L} = \frac{F_T \rho_T}{F \rho_c},$$

а истинная объемная ϕ_{L_0} и массовая ϕ_{L_T} концентрации легкого компонента найдутся из выражений:

$$\phi_{L_0} = 1 - \eta_{T_0} \quad \text{и} \quad \phi_{L_T} = 1 - \eta_{T_T}.$$

Обозначим через v_T , v_L и v_c - средние скорости тяжелого компонента, легкого компонента и смеси соответственно. Связь между ними определяется уравнением

$$Fv_c = F_T v_T + F_L v_L,$$

которое с учетом предыдущих зависимостей может быть представлено в виде

$$v_c = \eta_{T_0} v_T + \beta_{L_0} v_L = v - \eta_{T_0} (v_L - v_T).$$

Так как обычно имеет место соотношение $v_L > v_c > v_T$, то, следовательно, расходные концентрации δ_{T_0} и δ_{L_0} тяжелого компонента меньше истинных, а у легкого компонента, наоборот, - больше, т.е. $\beta_{L_0} > \beta_{L_0}$ и $\beta_{L_M} > \beta_{L_M}$. Степень различия между расходными и истинными концентрациями зависит от многих причин. В газожидкостных потоках во многих случаях при значительных скоростях смеси v_c средняя скорость воздуха v_L в 1,2-1,25 раз больше скорости смеси. Соответственно, $\beta_{L_0} = (0,80 + 0,83)\beta_{L_0}$. При малых скоростях смеси разница между β_{L_0} и β_{L_0} становится еще больше.

Если $\rho_L / \rho_T < 1$, то $\rho_c \approx \rho_L / (1 - \eta_{T_M})$. По аналогии с расходной концентрацией того или другого компонента введем понятие и о расходной плотности смеси ρ_{c_p} , которая в общем случае отличается от истинной плотности смеси в трубе ρ_c и определяется следующим уравнением, связывающим массовый и объемный расходы смеси:

$$Q_{c_M} = \rho_{c_p} Q_{c_0}.$$

Из этого уравнения получаем,

$$\rho_{c_p} = \delta_{T_0} \rho_T + \beta_{L_0} \rho_L \quad \text{или} \quad \rho_{c_p} = \rho_T - \beta_{L_0} (\rho_T - \rho_L).$$

Если скорости тяжелого v_T и легкого v_L компонентов равны друг другу, то

$$\rho_{c_p} = \rho_c.$$

Рассмотрим основные составляющие погрешности измерения расхода воды, обусловленные влиянием пульсирующих потоков на СУ.

При измерении нестационарных потоков перепад давления на СУ не является однозначной мерой величины расхода

$$q = \alpha \varepsilon F_2 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho} - \frac{A}{F_2} \cdot \frac{\partial q}{\partial t}},$$

где q - расход,

α - коэффициент расхода СУ,

ε - коэффициент сжимаемости,

F_2 - площадь поперечного сечения потока во втором контрольном сечении СУ,

Δp - перепад давления между контрольными сечениями I-I и II-II СУ (рис.1),

ρ - плотность измеряемой среды,

t - время,

A – коэффициент, учитывающий изменение площади сечения потока по продольной координате ($A = \int_{x_1}^{x_2} \frac{F_2}{F(x)} dx$, x_1 и x_2 – продольные координаты контрольных сечений СУ).

Пульсирующие потоки можно разделить на течения с периодической и произвольной пульсацией. В тех, и в других течениях после усреднения за достаточно большой период времени расход пульсирующих потоков остается примерно стационарным. Для пульсирующих потоков целью измерения может быть определение средних значений расхода q :

$$\bar{q} = \frac{1}{T} \int_T q(t) dt,$$

где T – время усреднения расхода.

Формула измерения \bar{q} по результатам регистрации $\bar{\Delta p}$ имеет вид квазистационарного соотношения $\bar{q} = k\sqrt{\bar{\Delta p}}$, где $k = \alpha \varepsilon F_2 / \sqrt{\rho}$. Этот метод содержит следующие основные составляющие погрешности измерения расхода.

1. Погрешность, обусловленную тем, что среднее значение квадратного корня всегда меньше значения квадратного корня из средней величины

$$\sqrt{\bar{\Delta p}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_T \Delta p(t) dt} > \sqrt{\Delta p} = \frac{1}{T} \int_T \sqrt{\Delta p(t)} dt.$$

2. Погрешность коэффициента расхода, поскольку среднее за период значение коэффициента расхода обычно не соответствует квазистационарной величине.

Методы измерения \bar{q} , основанные на регистрации $\Delta p = f(t)$ с последующим расчетом по $\bar{q} = k\sqrt{\bar{\Delta p}}$, содержат дополнительную погрешность, обусловленную инерционными эффектами в проточной части СУ. Естественно, что для этого метода погрешность, связанная с влиянием нестационарности на коэффициент расхода, также сохраняется.

Погрешность измерения расхода, вызванная квадратической зависимостью между расходом и перепадом давления, появляется при вычислении среднего значения пульсирующего расхода по формуле $\bar{q} = k_1\sqrt{\bar{\Delta p}}$. Эту систематическую погрешность часто называют «погрешностью квадратного корня» - E_k и обычно выражают следующей формулой:

$$E_k = \frac{q_0 - \bar{q}}{\bar{q}} = \frac{q_0}{\bar{q}} - 1,$$

где

$$q_0 = k \sqrt{\frac{1}{T} \int_T \Delta p dt} = k\sqrt{\Delta p},$$

$$\bar{q} = \frac{1}{T} \int_T k\sqrt{\Delta p} dt = k_1\sqrt{\bar{\Delta p}}.$$

Очевидно, что величина E_k зависит только от амплитуды и формы пульсаций расхода. Для случая изменения расхода по гармоническому закону $q = \bar{q}(1 + a \sin \omega t)$, принимая $k = k_1$, нетрудно получить следующую зависимость:

$$E_k = \sqrt{1 + \frac{a^2}{2}} - 1.$$

Поскольку амплитуду колебаний расхода практически определить трудно, значение E_k увязывают с амплитудными характеристиками пульсаций перепада давлений. Таким образом, для нахождения «погрешности квадратного корня», необходимо знать истинное значение амплитуды пульсаций перепада давлений на сужающем устройстве. Канал измерения Δp из-за наличия инерционных свойств будет искажать действительное значение амплитуды, и запись перепада давления на диаграмме дифманометра не отвечает истинному процессу колебаний. Это приводит к тому, что по записи невозможно определить достоверное значение амплитуды Δp , а также E_k и q_d . Для восстановления действительного значения амплитуды пульсаций перепада давления по результатам измерений необходимо наличие амплитудно-частотной характеристики «а» канала измерения Δp , которая представляет собой зависимость перепада давления на выходе $a_{\text{вых}}$ и входе $a_{\text{вх}}$ в канале измерения Δp от частоты колебаний f .

Проанализируем степень влияния «а» на E_k :

$$E_k = (q_u - q_d) / q_d = (\sqrt{\Delta p} - \sqrt{\bar{\Delta p}}) / \sqrt{\bar{\Delta p}} = \left(1 / \sqrt{0,5 \left[1 + \sqrt{1 - (\Delta p_{\text{ск}} / \bar{\Delta p})^2} \right]} \right) - 1,$$

$$\Delta p_{\text{ск}} = \sqrt{(\bar{\Delta p} - \Delta p)^2},$$

где q_u , q_d – измеренное и действительное значения расхода;

$\Delta p_{\text{ск}}$ - среднее квадратическое отклонение пульсаций перепада давления.

Расчет E_k был произведен для трех значений $\Delta p_{\text{ск}} / \bar{\Delta p} = 0,05; 0,1; 0,2$.

Если $a=1$, т. е. канал измерений передает колебания Δp без искажений, то, измерив величину $\Delta p_{\text{ск}} / \bar{\Delta p}$ по записи на диаграмме, можно определить E_k и, соответственно, $q_d = q_u / (1 + E_k)$. Если $0 \leq a < 1$, то канал измерения обладает демпфирующими свойствами и гасит колебания Δp . Это приведет к тому, что измеренное значение амплитуды будет меньше действительного и величина E_k будет занижена по сравнению с ее значением при $a=1$, а восстановленное значение расхода будет больше q_d . Максимальное расхождение будет при $a=0$, что соответствует полному гашению колебаний при обработке диаграммы без учета пульсаций по средней линии. Противоположная картина наблюдается при $a > 1$, т. е. когда канал измерения обладает резонансными свойствами и увеличивает амплитуду пульсаций Δp .

Результаты анализа влияний «а» на E_k подтверждают вывод о том, что отсутствие данных об амплитудно-частотной характеристике канала измерения Δp может на порядок увеличить погрешность при определении расхода.

Точность измерений расхода, протекающей в водоводе жидкости, зависит от того, насколько правильно определена действительная площадь поперечного сечения потока. При определении внутреннего диаметра трубопровода необходимо учитывать толщину отложений на его стенках, которые сужают его сечение. Изменение геометрии сечения трубы и шероховатости ее поверхности приводит к росту погрешности измерения расхода.

Влияние отложений для времени импульсного метода измерения расхода оценим через измерение физической величины, которой является значение разности времени прохождения луча по и против направления потока, пропорциональное значению расхода. При прохождении отрезка пути луча длиной dl (в обе стороны) временная задержка составит

$$dt = 2 dl v(l) c^{-2} \cos \alpha, \quad (2)$$

α - угол между направлением луча и осью трубопровода,
 $v(l)$ - продольная скорость потока, усредненная по длине dl ,
 c - скорость ультразвука в измеряемой жидкости.

Подставив значение $dl = dx / \sin \alpha$, получим выражение

$$dt = 2 c^{-2} v(l) \operatorname{ctg} \alpha dx$$

Суммарная разность хода луча dT составит

$$dT = 2 c^{-2} \operatorname{ctg} \alpha \int_{-\frac{D}{2}}^{\frac{D}{2}} V(x) dx.$$

Профиль скоростей оказывает существенное влияние на показания ультразвуковых расходомеров и их погрешность. Форма профиля скоростей потока может быть разной, в том числе и несимметричной. Оценим влияние отложений на результат измерений, задавшись, исходя из наибольшего упрощения, прямоугольной формой профиля скоростей: в трубопроводе внутренним диаметром D и в трубопроводе, у которого на внутренней поверхности имеются отложения толщиной d . Соответственно, внутренний диаметр последнего равен $(D-2d)$. Примем, что расходы в обоих случаях одинаковы ($q_0 = q_1 = q$).

Из уравнений для расхода $q_0 = \frac{\pi D^2}{4} v_0$ и $q_1 = \frac{\pi (D-2d)^2}{4} v_1$ видно, что при неизменном расходе скорость в трубопроводе после появления отложений увеличится в $k = \frac{v_1}{v_0} = \left(\frac{D}{D-2d} \right)^2$ раз.

Геометрически величина расхода соответствует объему цилиндра, полученного вращением соответствующего профиля потока вокруг продольной оси потока. В соответствии с формулой (2) суммарная разность хода луча пропорциональна площади профиля скоростей, поэтому можно записать соотношения для обоих случаев:

$$dT_0 = k_1 D v_0 \text{ и } dT_1 = k_1 (D - 2d) v_1 ,$$

где dT_0 и dT_1 - значения разности хода луча в первом и втором случаях, k_1 - коэффициент пропорциональности. Отсюда получается

$$\frac{dT_0}{dT_1} = \frac{D - 2d}{D} .$$

Тогда значение завышения показаний равно

$$A = \frac{dT_1}{dT_0} = \frac{D}{D - 2d} .$$

Автором выведено аналитическое выражение для определения процентного отношения толщины отложений относительно площади сечения

без отложений:

$$\frac{S_{\text{кольцо отлож}^*}}{S_{\text{сеч без отлож}}} = \frac{4d(D - d)}{D^2} 100\% ,$$

где «кольцо отложений *» - осредненное значение толщины отложений на внутренней поверхности трубопровода по всему сечению.

Автором найдено аналитическое выражение погрешности завышения показаний:

$$\delta = \left(\frac{D}{D - 2d} - 1 \right) \cdot 100\% .$$

В результате анализа отношения сигнал-помеха получено, что наибольший вклад в погрешность результата измерений вносят:

- многофазность потока,
- нестационарность потока (пульсация),
- зарастание труб в зоне измерительных участков.

Влияние этих факторов на различные средства измерений неодинаково, так:

- при содержании воздуха в воде до 5 % погрешность тахометрических приборов может увеличиться с 5 % до 30 %;
- при отношении среднего значения пульсаций к максимальному значению, равному 0,5 погрешность сужающих устройств может составлять 6 %,
- при относительной толщине отложений на внутренней поверхности измерительного участка завышение показаний ультразвуковых расходомеров может составить более 20 %.

В третьей главе приведены результаты исследования составляющих инструментальной погрешности и разработки способов повышения стабильности эксплуатации узлов измерения и учета.

Экспериментальные исследования проводились по двум направлениям:

- 1) исследования параметров водных потоков в условиях эксплуатации ГУП «Водоканал СПб»,
- 2) исследования средств измерений, сертифицированных и допущенных к применению на территории РФ, в условиях эксплуатации ГУП «Водоканал СПб».

Среди параметров водных потоков исследовались: диапазон скоростей, многофазность, степень искажения эпюры скоростей, амплитуда пульсаций.

Из результатов обследования получено, что до 10 % трубопроводов имеют заполнение воздухом до 20 % водовода в плоскости измерения.

С целью выявления параметров водного потока проводилось исследование в двух измерительных точках на одном входном водоводе, Ду 900 мм, в пос. Горская ультразвуковым расходомером УРСВ-010М, стационарно установленным в камере (по рисунку «камера») с соблюдением прямых участков, и переносным ультразвуковым расходомером фирмы «Panametrics» РТ-878, установленным в котловане на расстоянии 300 м впереди камеры (по рисунку «котлован»). Измерения проводились в течение трех часов. В каждом положении датчиков (А-В, Е-Ф, С-Д, G-Н) измерения выполнялись по 15 минут (рис.2).

Расхождение результатов измерений, %, между стационарным расходомером УРСВ-010М и переносным расходомером РТ-878 показано на рис. 3. Анализ результатов показал:

- 1) в положении датчиков А-В измерения РТ-878 выполнялись стабильно, без возникновения нештатных ситуаций типа «разрыв синхрокольца», что позволило сделать вывод об отсутствии завоздушивания в зоне измерительного участка,

- 2) эпюра скоростей потока не сформирована, т. е. наличие прямых участков на этом объекте для обеспечения сформированности эпюры скоростей потока оказалось недостаточным.

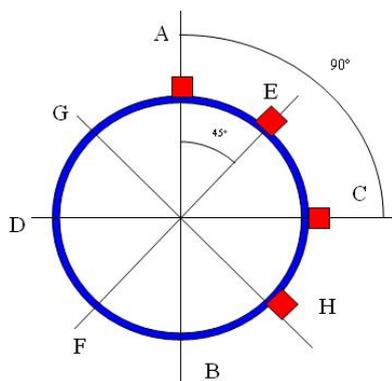


Рис. 2.

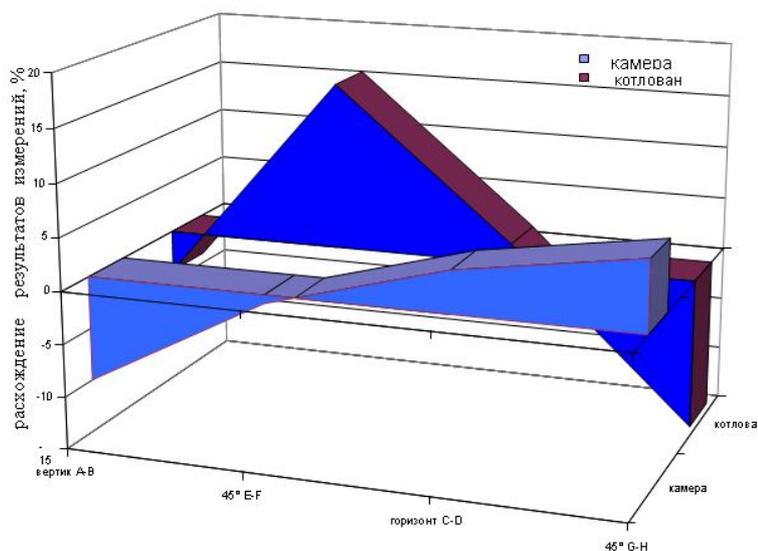


Рис. 3.

Результаты экспериментальных исследований пульсирующего характера движущейся в трубопроводах воды проводились на Южной водопроводной станции (ЮВС) ГУП «Водоканал СПб». Измерения пульсаций давления проводились манометрами переменного давления, каждый из которых состоит из измерительного преобразователя, пьезоэлектрического датчика ППД 16-36 КР, высокоомного согласующего усилителя, селективного нановольтметра «Unipan». Измерительный канал аттестован во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева на эталоне переменных давлений в частотном диапазоне $1 \div 1000$ Гц (ГОСТ 8.433-81). Во всех точках измерения (1,2,3,4) (рис. 4) имеются пульсации давления амплитудой $0,44 \div 1,33$ кПа/Гц в частотном диапазоне 1-10 Гц.

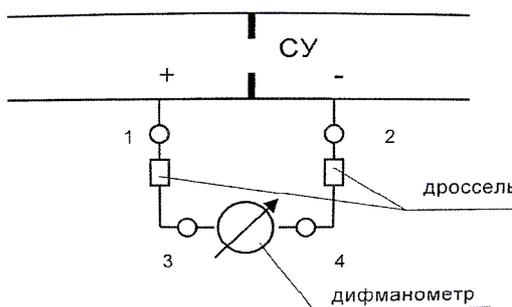


Рис. 4.

При измерении расхода на сужающем устройстве уровень пульсаций составляет 10-20 % перепада давления.

Установка дросселей в соединительных линиях приводит к подавлению пульсаций на частоте 80 Гц и частичному подавлению на частоте 10 Гц.

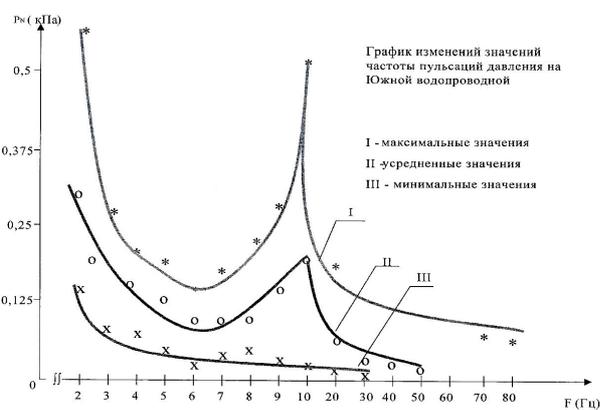


Рис. 5.

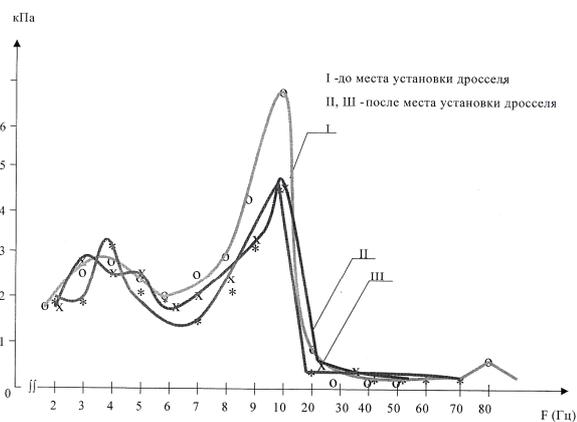


Рис. 6.

На рис. 5 и 6 представлены графики изменений значений амплитуды и частоты пульсаций давления на водоводах ЮВС.

Для средств измерений наиболее характерными составляющими инструментальной погрешности являются: зона дрейфа нуля, изменение наклона амплитудной характеристики, нелинейность, шум, приведенный к выходу.

Проведены исследования составляющих погрешности ультразвуковых переносных расходомеров-счетчиков фирмы «Микроникс», Англия: «Portaflo

МК II», и «Акрон 01», Россия. Обработка результатов измерений проводилась в соответствии с ГОСТ 8.207-76 «ГСИ. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения», а также работой П. В. Новицкого, И. А. Зографа «Оценка погрешностей результатов измерений». Места проведения испытаний: стенд ПНИПКУ «Венчур» и стенд JOS-200 ГУП «Водоканал СПб».

Испытания показали хорошие возможности приборов для использования их при выполнении контрольных измерений расхода, объема, скорости и направления движения воды в водоводах диаметром от 20 мм до 2000 мм при скоростях движения воды до 12 м/с с регистрацией суточных расходов в качестве переносной меры в передвижной калибровочной лаборатории.

Автором исследовано средство калибровки (групповая мера), разработанное А. А. Мурлиным, Н. М. Рыжковым, В. М. Симахиным, Н. В. Филиповской (патент на изобретение № 2217704) на основе ультразвукового накладного расходомера-счетчика с основной погрешностью до 0,3% в диапазоне скоростей от 0,1 до 3 м/с, которое обеспечивает возможность длительной эксплуатации средств измерения без нарушения технологического процесса очистки воды, и отработана методика выполнения измерений (МВИ) для расходомера-счетчика многоканального типа РСМ, испытания, на утверждение типа которого проводились ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», сертификат RU.E.29.001.A №11455.

Выполнен анализ работы узлов измерений и учета воды на Пулковской насосной станции: до модернизации на базе ультразвукового расходомера-счетчика типа УРСВ-010М фирмы ЗАО «Взлет», г. Санкт-Петербург, и после модернизации, разработанного по новому проекту на базе ультразвукового расходомера-счетчика типа УРСВ-522.

В диссертации представлены материалы:

- предпроектного исследования объекта и факторов, увеличивающих погрешность результата измерения;
- фрагменты проекта нового узла учета, который был разработан с целью минимизировать погрешность результата измерения путем учета выявленных во время предпроектного обследования факторов, искажающих результат измерения.

Для обеспечения согласования параметров водного потока с параметрами выбранного средства измерений было предусмотрено следующее (рис.7): удаление воздуха из измерительного участка трубопровода; обеспечение скорости потока жидкости более 0,3 м/с; обеспечение сформированного потока жидкости; уменьшение возможности образования отложений на стенках трубопровода измерительного участка; обеспечение возможности выполнения осмотра и чистки измерительного участка.

После 10-месячной эксплуатации узла измерений и учета воды анализ полученных результатов показал следующее:

- диапазон скоростей до модернизации был $0,1 \div 0,5$ м/с, рассчитанный при проектировании получен $0,31 \div 1,5$ м/с, фактический при эксплуатации составил $0,43 \div 1,42$ м/с;
- диапазон составляющей инструментальной погрешности до модернизации составлял $\pm (3,5 \div 1,9)$ %, после модернизации составил $\pm (0,7 \div 0,5)$ %;
- наличие нештатных ситуаций в архивах УРСВ-522 было зафиксировано менее получаса по продолжительности за все время 10-месячной опытной эксплуатации.

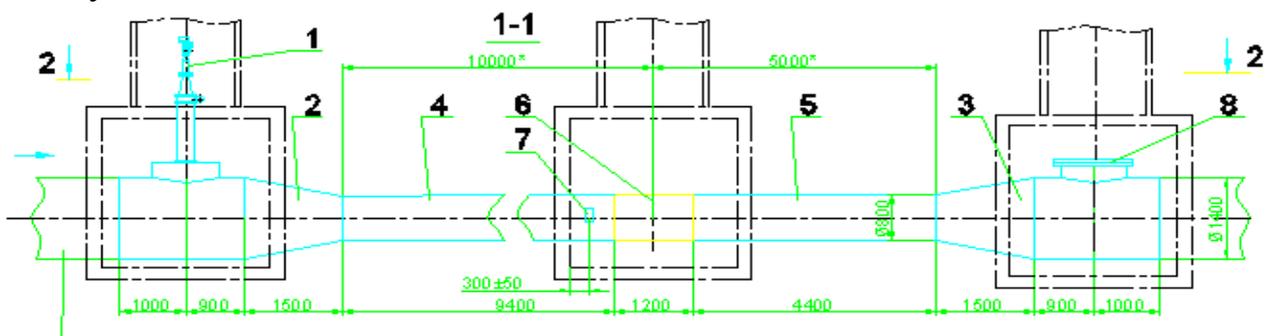


Рис. 7. Фрагмент сборочного чертежа нового узла учета: аэрационный узел - 1; струевыпрямитель-конфузор - 2; диффузор - 3; измерительный участок (ИУ) - 6; прямые участки до и после ИУ - 4, 5; датчик давления - 7; камера для обеспечения возможности выполнения осмотра и чистки измерительного участка - 8.

Таблица 1.

Забор воды из р. Невы					
Суммарный объем (тыс. куб. м), рассчитанный			Разница в расчетах (%) между сумм. объемами, полученная:		
станцией по производительности и насосов	по приборам без учета НС	с учетом НС заявляемым способом	"по насосам" и "по приборам" без учета НС	"по насосам" и "по приборам" с учетом НС" заявляемым способом	
январь.05	29791	28026,0	30173	-5,9%	1,3%
декабрь.04	30223,9	28145,9	30223,9	-6,9%	0,0%
ноябрь.04	29201,5	27011,2	29201,5	-7,5%	0,0%
октябрь.04	30412,1	30324,1	30412,1	-0,3%	0,0%
сентябрь.04	27380,3	26734,6	27380,3	-2,4%	0,0%
август.04	24880,4	24821,3	25148,3	-0,2%	1,1%
июль.04	23766	23650,9	23847,8	-0,5%	0,3%
июнь.04	26121,9	26016,1	26059,5	-0,4%	-0,2%
май.04	30775	30708,3	30713,4	-0,2%	-0,2%
апрель.04	31854,7	31329,9	31854,7	-1,6%	0,0%
март.04	32631,8	32061,7	32061,7	-1,7%	-1,7%
февраль.04	29835,4	29061,2	29835,4	-2,6%	0,0%
январь.04	34374,4	26854,0	34101,6	-21,9%	-0,8%

В табл. 1 представлено экспериментальное исследование определения суммарного объема воды, забранного из реки Нева, с учетом объемов воды во время нештатных ситуаций, возникающих на узлах учета воды, на примере Южной водопроводной станции, на основе способа определения неучтенного объема, ставшего базой для разработки «Методики расчета фактического водопотребления и водоотведения филиалами ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» и у его абонентов».

Разница в результатах учета между объемами воды, полученная по производительности насосов и по приборам без учета объемов во время нештатных ситуаций, составила от минус 0,2 до минус 21,9 % , а с учетом объемов воды за время нештатных ситуаций: от минус 1,7 до плюс 1,3 %, что на порядок меньше.

В четвертой главе изложены особенности разработанных способов измерения расхода и объема воды:

- способа измерения расхода воды в скрытых протяженных трубопроводах большого диаметра с малой скоростью потока, таких, как находящихся в эксплуатации дюкерных переходов.
- способа измерения расхода и объема многофазной жидкости в условиях пульсирующего потока,
- способа определения неучтенного объема воды, позволяющего определить неучтенные объемы воды при возникновении нештатных ситуаций, во время которых объемы воды не регистрируются или регистрируются с разрывами.

Проведенные экспериментальные исследования показали возможность коррекции на узлах измерений и учета искажений измерительной информации.

Погрешность результата измерений расхода и объема воды при этом рассчитывалась по формуле:

$$\delta = \sqrt{\delta_{осн}^2 + \delta_{доп}^2 + \delta_{ФАЗН}^2 + \delta_{НЕСТАЦ}^2 + (\delta_{осн}'')^2 + \delta_{НЕСФОРМ}^2 + \delta_{ИК}^2} ,$$

где δ - погрешность результата измерений,

$\delta_{осн}$ - основная погрешность средства измерений,

$\delta_{доп}$ - дополнительная погрешность средства измерений, нормируемая в технической документации,

$\delta_{осн}''$ - погрешность определения площади поперечного сечения потока,

$\delta_{ФАЗН}, \delta_{НЕСТАЦ}, \delta_{НЕСФОРМ}$ - составляющие погрешности узла учета, ненормируемые в технической документации на прибор и зависящие от условий эксплуатации,

$\delta_{ИК}$ - погрешность линии измерительного канала.

Заключение

В диссертационной работе дано решение актуальной задачи создания системы измерений и учета объемов воды, которая в отличие от существовавшей обеспечивает согласование требований к установке средств измерений с условиями измерений и имеет более достоверные результаты измерения для нестационарных двухфазных потоков в условиях эксплуатации,

и имеет существенное значение в городских и других отраслях народного хозяйства. Особое внимание уделено исследованию погрешностей измерения расхода и объема воды, поиску способов и средств их уменьшения.

В результате теоретических и экспериментальных исследований в диссертации решен ряд конкретных задач и обоснованы следующие выводы и положения:

1. В результате проведенного анализа погрешностей измерения расхода воды, выявлены и исследованы источники погрешности измерения в условиях реальной эксплуатации, получены отношения сигнал/помеха для различных вариантов создания узлов учета.

Исследовано средство калибровки (групповая мера) с основной погрешностью до 0,3 % в диапазоне скоростей 0,1 до 3 м/с, которое обеспечивает возможность длительной эксплуатации средств измерения без нарушения сложного технологического процесса очистки воды, отработана МВИ в рамках расходомера-счетчика многоканального РСМ.

Результатом поиска способа построения узла измерения и учета с наименьшими погрешностями измерения явился выбор построения узла измерения и учета с устройством принудительного формирования потока, воздухоотделением и введением системы контроля условий измерения и калибровки по результатам предпроектного обследования.

2. Предложен способ определения параметров водных потоков при действии ряда влияющих величин. Получены аналитические выражения и числовые значения составляющих погрешностей узла учета, предложено уточнение формулы погрешности узла, что позволило определить необходимые его метрологические параметры при действии помех в натуральных условиях. Измерена степень завоздушивания ряда водоводов диаметрами до 1400 мм, которая составила 20 % объема для 10 % водоводов. После принятия мер по разделению фаз объем свободного воздуха снижен до уровня чувствительности ультразвукового расходомера (до 2 %)

3. Разработаны узлы измерения и учета объемов воды с погрешностью до 3 %, адаптированные к конкретным условиям эксплуатации. Для канализационной насосной станции с пульсирующим характером перекачки может быть введен поправочный коэффициент на динамическую погрешность в зависимости от скважности.

4. Исследована степень несформированности потока, отработана методика определения параметров искажения потока, которая учитывает систематическую часть искажения потока в виде гидродинамического коэффициента (коэффициента асимметрии), который, в свою очередь, характерен для каждой точки, например, неравномерность измеренных скоростей потока в измерительной плоскости для узла учета диаметром условного прохода (D_u) 1400 мм, на Пулковской насосной станции, до модернизации, была установлена до 13,8 %, коэффициент асимметрии с

включением корректировки на число Рейнольдса составил 0,907, а без включения корректировки на число Рейнольдса - 0,941.

5. Разработана методика расчета влияния толщины отложений на результат измерения времяимпульсного ультразвукового метода измерения расхода воды, по которой определяется коэффициент коррекции в зависимости от диаметра условного прохода (D_u) и толщины отложений на внутренней поверхности измерительного участка (мм), например, при толщине отложений от 1 до 10 мм для $D_u=100$ мм находящийся в диапазоне от 0,99 до 0,8, а для $D_u=1000$ мм в диапазоне от 0,999 до 0,98.

6. Разработан способ определения неучтенных объемов воды, ставший основой «Методики расчета фактического водопотребления и водоотведения филиалами ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» и у его абонентов», применяемой в ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» и согласованной с его абонентами с весны 2004 года, позволивший на порядок уменьшить погрешность определения фактического объема водопотребления.

7. Проведенные стендовые исследования ряда узлов показали возможность измерения с погрешностью до 2-5 %, что соответствует общеевропейскому уровню.

8. Созданные образцы узлов измерения и учета, а также узлы, прошедшие модернизацию, изготовлены и установлены в ряде производственных точек. На наблюдаемых узлах получены хорошие совпадения с результатами измерений переносных мер, которые предварительно калибровались по эталонам (или стендам).

9. Новизна предложенных технических решений подтверждена патентами на «Ультразвуковой способ измерения расхода воды в трубопроводах, преимущественно на дюкерных переходах», «Способ измерения расхода и объема многофазной жидкости в условиях пульсирующего потока» и «Способ определения неучтенного объема».

10. Технические разработки внедрены в системе ГУП «Водоканал СПб» и у его абонентов, используются для решения хозяйственных задач, что подтверждается прилагаемыми актами внедрения.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. А. П. Зайцев, Н. Л. Романова, В. М. Симахин, Н. В. Филиповская. Определение объемов фактического водопотребления и водоотведения средствами измерений // Водоснабжение и санитарная техника, № 1, часть 1, 2006, с. 33-38.

2. А. А. Мурлин, В. М. Симахин, Н. Л. Романова, Н. В. Филиповская. «Ультразвуковой способ измерения расхода воды в трубопроводах, преимущественно на дюкерных переходах», патент на изобретение № RU 2290609, опубликовано: 2006.12.27.

3. А. П. Зайцев, Н. Л. Романова, В. М. Симахин, Н. В. Филиповская. «Способ измерения расхода и объема многофазной жидкости в условиях пульсирующего

потока», патент на изобретение № RU 2294528, опубликовано: 27.02.2007 Бюл. № 6.

4. А. П. Зайцев, Н. Л. Романова, В. М. Симахин, Н. В. Филипповская, С. В. Мурашев. «Способ определения неучтенного объема воды», патент на изобретение № RU 2362122, заявка № 2007116419/28(017853), дата подачи заявки 02.05.2007.

5. А. П. Зайцев, Н. Л. Романова, В. М. Симахин, Н. В. Филипповская. Состояние и перспективы развития системы учета воды в Водоканале Санкт-Петербурга // Водоснабжение и санитарная техника», № 2, 2009, с. 17-21.

6. Н. Л. Романова. Оценка условий измерения по результатам опытной эксплуатации приборов учета // Материалы 26 международной научно-практической конференции «Коммерческий учет энергоносителей», ноябрь 2007 г., с. 173-187.

7. А. П. Зайцев, Н. Л. Романова, В. М. Симахин, Н. В. Филипповская, Р. А. Пирумов. Метрологическое обеспечение измерений расхода и объема воды в ГУП «Водоканале Санкт-Петербурга // Материалы 1 международного конгресса «ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ. XXI ВЕК. Инженерные методы снижения энергопотребления зданий», 2009, с. 54- 62.

8. А.П. Зайцев, Н.Л. Романова, В.М. Симахин, Н.В. Филипповская. Опыт организации учета объемов воды в системе водоснабжения ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» и его абонентов // Материалы XIX международной научно-практической конференции «Коммерческий учет энергоносителей», 2004, с. 199-206.

9. А.П. Зайцев, Н.Л. Романова, В.М. Симахин, Н.В. Филипповская. Обеспечение достоверного учета объемов воды в системе водоснабжения ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» и его абонентов // Энергосбережение», 2004 № 4, с. 3-5.

10. И. С. Вихрова, А.П. Зайцев, Н.Л. Романова, В.М. Симахин, Н.В. Филипповская. Обработка результатов измерений при определении неучтенных объемов водопотребления и водоотведения // Материалы XX международной научно-практической конференции «Коммерческий учет энергоносителей», 2004, с. 210-214.

11. А.П. Зайцев, Н.Л. Романова, Н.В. Филипповская, Р.А. Пирумов. Проблемы квартирного учета воды // Материалы симпозиума «Мир измерений и учета», 2005, с. 125-131.

12. А.П. Зайцев, Н.Л. Романова, В.М. Симахин, Н.В. Филипповская. Оценка погрешности результатов измерения объема воды на узлах учета ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» и его абонентов при определении фактического водопотребления в случае возникновения нештатных ситуаций // Материалы XXI международной научно-практической конференции «Коммерческий учет энергоносителей», 2005, с. 422-429.

13. А.П. Зайцев, Н.Л. Романова, В.М. Симахин, Н.В. Филипповская, Р.А. Пирумов. Определение объемов фактического водопотребления и

водоотведения при эксплуатации средств измерений // Энергосбережение, 2005 № 5, с. 26-29.

14. А.П. Зайцев, Н.Л. Романова, В.М. Симахин, Н.В. Филиповская. Совершенствование системы учета количества воды в ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» // Материалы XXVII международной научно-практической конференции «Коммерческий учет энергоносителей», 2008, с. 311-318.