

УДК 621.317.785(085)(476)

П. К. НАГУЛА, М. Н. КОЗЕЛ, С. В. РЫБЧАК, К. В. ЮРГАНОВ

**СРЕДСТВА УЧЕТА ОБЪЕМНОГО И МАССОВОГО РАСХОДА,
ЭКСПЛУАТИРУЕМЫЕ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ. ОПЫТ ПОВЕРКИ
И КАЛИБРОВКИ НА УСТАНОВКЕ «ЭТАЛОН»**

*Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны НАН Беларуси,
Минск, Беларусь, e-mail: nagulapk@mail.ru*

Одной из важнейших технических задач промышленности Республики Беларусь является измерение массового и объемного расхода как основы для обеспечения технологического учета в энергосберегающих и ресурсосберегающих технологиях. Для решения этой задачи разрабатывается множество средств измерений, которые подлежат обязательному метрологическому контролю. В данной статье приводятся анализ основных типов средств измерений расхода, которые применяются на промышленных предприятиях Республики Беларусь, современные требования, предъявляемые к расходомерам, а также оценка метрологической надежности во времени для некоторых типов расходомеров.

Ключевые слова: массовый и объемный расход, метрологическая надежность, метрологические характеристики, поправочный коэффициент, средство измерений.

P. K. NAHULA, M. N. KOZEL, S. V. RYBCHAK, K. V. YURGANOV

ACCOUNTING MEANS OF VOLUME- AND MASS FLOW, OPERATING IN THE REPUBLIC OF BELARUS. EXPERIENCE VERIFICATION AND CALIBRATION AT «ETALON»

*The Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Belarus, e-mail: nagulapk@mail.ru*

One of the major technical problems of industry of the Republic of Belarus is the measurement of mass and volume flow rate, as the basis for technological consideration in energy-saving and resource-saving technologies. To solve this task many measuring instruments subject to metrological control are developed. This article provides an analysis of the main types of means of discharge measurements, which are used at the industrial enterprises of the Republic of Belarus, the modern requirements for flow meters, as well as assessment of the metrological reliability in time for some types of flowmeters.

Keywords: mass and volume flow rate, metrological reliability, metrological characteristics, correction factor, measuring instrument.

Введение. В современной промышленности и повседневной жизни вопросы измерения расхода различных жидкостей, газов и веществ имеют большое значение. Их роль в настоящее время существенно возрастает в связи с коммерциализацией учета энергоносителей и необходимостью максимальной экономии энергетических и водных ресурсов страны, которые все больше дорожают.

Без расходомеров невозможно обеспечить управление и оптимизацию технических и/или технологических режимов в энергетике, металлургии, химической и нефтехимической, газовой, целлюлозно-бумажной, пищевой и в других отраслях промышленности. Без этих средств измерений невозможны и автоматизация производства, и достижение его максимальной эффективности [1].

На территории Республики Беларусь номенклатура применяемых средств учета объемного и массового расхода в настоящее время значительно расширилась за счет освоения расходомеров и счетчиков как отечественного, так и импортного производства. В Государственный реестр средств измерений Республики Беларусь внесено 221 наименование средств измерений расхода разных типов (включая исключенные из реестра и просроченные средства измерений расхода) [2].

Однако сложности конструкций, алгоритмов работы, монтажа и эксплуатации средств измерений создают возможность некорректной работы, фальсификации показаний и некачественного сервисного обслуживания данных средств измерений. В результате проблема учета газа и различных жидкостей переросла из чисто государственной в коммерческо-потребительскую.

Часто результаты государственных испытаний на надежность при утверждении типа средства измерений, проводимых в лабораторных условиях, не дают объективной информации о деградации измерительных каналов средств измерений в реальных условиях эксплуатации под воздействием внешних факторов. В существующей на данный момент нормативной документации, устанавливающей требования к межповерочным интервалам, рассматривается тип средства измерения, а не конкретный экземпляр, при этом характер временных изменений метрологических характеристик может быть весьма разнообразным даже у однотипных средств измерений. Поэтому для повышения достоверности исследований необходимо учитывать как индивидуальные особенности средства измерений расхода, так и условия его эксплуатации.

Цель данной статьи – оценка работ по периодической поверке расходомеров на установке «Исходный эталон единиц массового и объемного расхода воды № ИЭ РБ 9–05» в период с 2008 по 2015 г. Проанализированы основные типы средств измерений расхода, которые применяются на промышленных предприятиях Республики Беларусь, определены современные требования, предъявляемые к расходомерам, а также представлены результаты оценки метрологической надежности для некоторых типов расходомеров в плане дальнейшего повышения точности и универсальности их применения.

Современные требования, предъявляемые к средствам измерений объемного и массового расхода, многочисленны и разнообразны. Одно средство измерений не может удовлетворять всем требованиям, поэтому при выборе того или иного типа средства следует исходить из сравнительной важности тех или иных требований, предъявляемых к измерению расхода или количества в каждом случае.

Рассмотрим базовые требования [3], предъявляемые к расходомерам и счетчикам:

1. **Точность средства измерений.** Характеристика качества средства измерений, отражающая близость его погрешности к нулю. Это важно, когда необходимо измерять не мгновенный расход, а количество (массу или объем) прошедших через расходомер веществ. Если раньше погрешность измерения в 1,5–2% считалась приемлемой, то теперь нередко требуется иметь погрешность не более 0,05–0,5%.

2. **Метрологическая надежность.** Подразумевается надежность средств измерений в части сохранения его метрологической исправности. Она оценивается временем, в течение которого средство измерений сохраняет работоспособность и все его нормируемые метрологические характеристики соответствуют установленным требованиям. Она зависит от типа средства измерений и от условий его эксплуатации. Некоторые расходомеры и их элементы, не имеющие движущихся частей, могут надежно работать продолжительное время. Тахометрические расходомеры и счетчики с движущимся ротором имеют много меньший срок службы, зависящий от степени чистоты измеряемого вещества и его смазывающей способности.

3. **Малая зависимость точности измерения от изменения плотности вещества.** Лишь тепловые и силовые расходомеры, измеряющие массовый расход, обладают этим ценным свойством. У других типов приборов надо иметь устройства, автоматически вводящие коррекцию на изменение плотности или хотя бы температуры и давления измеряемого вещества. Это особенно необходимо при измерении расхода газа.

4. **Быстродействие прибора или его высокие динамические характеристики.** Это важно, когда расходомер применяют в системах автоматического регулирования и при измерении быстроменяющихся расходов. Быстродействие удобно оценивать значением постоянной времени T прибора, т. е. временем, в течение которого его показания при скачкообразном изменении расхода от Q_1 до Q_2 изменяются приблизительно на две трети от значения $Q_2 - Q_1$. Имеется большая градация быстродействия T , которая измеряется в пределах сотых и тысячных долей секунды у турбинных расходомеров, и величины T , измеряемая десятками секунд у тепловых расходомеров. Для улучшения быстродействия последних применяют особые (дифференцирующие) измерительные схемы.

5. **Широкий диапазон измерений Q_{\max}/Q_{\min} .** Область значений величины, в пределах которой нормированы допускаемые пределы погрешности средства измерений.

6. **Обеспеченность метрологической базой.** В настоящее время в состав метрологической базы по обслуживанию средств измерений расхода на территории Республики

Беларусь входит 125 проливных установок, которые прошли метрологический контроль в РУП «БелГИМ». Они обеспечивают осуществление метрологического контроля расходомеров и счетчиков воды, в том числе из состава теплосчетчиков. Только 68 проливных установок реализуют измерение массового и объемного расхода методом статического взвешивания, что составляет порядка 54% от их общего количества.

7. **Ш и р о к и й д и а п а з о н п о к а з а н и й.** Область значений шкалы, ограниченная начальной и конечной величинами. Для жидкостей требуется измерять расходы в пределах от 10^{-2} до 10^5 – 10^6 кг/ч, а для газов – в пределах от 10^{-4} до 10^7 – 10^8 кг/ч, т. е. расходы, значения которых отличаются на десять порядков. Особые трудности возникают при измерении как малых, так и больших расходов, здесь нередко приходится применять особые методы измерения, например, парциальный (при больших расходах).

8. **Э к с т р е м а л ь н ы е у с л о в и я э к с п л у а т а ц и и.** Необходимость измерения расхода не только в нормальных, но и в экстремальных условиях при очень низких или высоких температурах и давлениях. Расход криогенных жидкостей (например, сжиженного водорода) надо измерять при низких температурах (до -255 °С), а расход перегретого пара сверхвысокого давления и расход расплавленных металлов теплоносителей – при температурах, достигающих $+600$ °С. Подобные условия создают дополнительные трудности для обеспечения надежного измерения расхода.

9. **Ш и р о к а я н о м е н к л а т у р а и з м е р я е м ы х в е щ е с т в.** Вещества могут быть не только однофазными и однокомпонентными, но также многофазными и многокомпонентными. Основные методы измерений расхода разрабатывались в основном для однофазных сред, т. е. для жидкости, газа и пара.

При этом необходимо учитывать как параметры (давление, температура), так и особые свойства (агрессивность, абразивность, токсичность, взрывоопасность и т. д.) веществ внутри каждой из этих сред. Особая задача – измерение расхода расплавленных металлов-теплоносителей при высоких температурах. Все актуальнее становится процесс измерения двухфазных и иногда трехфазных сред. К ним относятся гидросмеси или пульпы, смеси твердой и газообразной фаз, смеси жидкости с газом (нефтегазовая смесь) или с паром (влажный пар) и газированная пульпа, представляющая собой смесь всех трех фаз [3].

Опыт работы по периодической поверке и калибровке средств измерений расхода. На производственных площадях Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны НАН Беларуси в рамках ГНТП «Эталоны Беларуси» в 2003 г. создан «Исходный эталон единиц массового и объемного расхода воды № ИЭ РБ 9-05» (далее установка «Эталон»), основными задачами которого являются воспроизведение, хранение, передача единицы расхода нижестоящим средствам измерений и подтверждение их характеристик требованиям установленных норм точности.

На белорусском рынке средств учета объемного и массового расхода представлены средства измерений импортного и отечественного производства. Рассматриваемый рынок условно можно разделить на семь сегментов по отраслям экономики (материального производства и социально-культурной ориентации, так называемой сферы услуг):

- пищевая промышленность занимает порядка 38% в количественном выражении всего рынка;
- топливная промышленность (для РБ в основном это газовая и нефтеперерабатывающая) занимает порядка 25% в количественном выражении всего рынка;
- машиностроение и металлообработка 3%;
- химическая и нефтехимическая промышленность 4%;
- электроэнергетика 2%;
- сфера услуг (наука, ЖКХ, торговля и др.) занимает порядка 27% в количественном выражении всего рынка;
- прочие виды деятельности 2%.

На целевом рынке представлены преимущественно средства учета зарубежного производства с рыночной долей 86% в количественном и стоимостном выражении всего рынка средств учета массового и объемного расхода. Лидерами по объемам поставок являются такие известные компании, как Endress+Hauser Flowtec AG (Швейцария), Krohne (Германия), Yokogawa Electric Corporation (Япония), Emerson Process Management (Германия), SIEMENS AG (Германия)

и ABB Automation Systems (Германия) [2], которые уже прочно закрепились на рынке и нашли своего потребителя, хотя конкуренция между ними все еще существует.

Средства учета расхода отечественного производства занимают на рынке долю в 14% (количественная оценка) и характеризуются умеренными темпами роста производства. Основными белорусскими производителями на рынке средств учета можно назвать такие компании, как ООО «АРВАС», НП ООО «Белсимет», УП «Минсккоммунтеплосеть», РУП «БЕЛТЭИ», СП ООО «Термо-К», НП ООО «Гран-Система-С», ООО «ТЭМ-энерго», ООО «ВОГЕЗ ЭНЕРГО», ООО «ФАКОМТЕХНОЛОДЖИЗ» и др. [2].

В целом спрос на все средства учета определяется проводимой политикой государства по переходу к энергосберегающим и ресурсосберегающим технологиям. В коммунальном хозяйстве измеренный расход жидкости лежит в основе расчетов за потребление воды, за водоотведение и за тепловую энергию, в нефтегазовой промышленности расход жидкости является одним из основных технологических параметров, контролирование которых обеспечивает управляемость производственными процессами.

Все эксплуатируемые расходомеры можно четко разделить по принципу действия, причем каждый тип расходомеров имеет свои особенности и занимает соответствующую нишу на рынке Республики Беларусь.

Как видно на рис. 1, белорусский рынок представлен следующими типами расходомеров:

электромагнитные расходомеры 38% (среди них наиболее распространены Promag 10/30/33/50/53H (Endress+Hauser) 56%, Sitrans F M Magflo MAG5000/MAG6000 (SIEMENS) 39% от общего количества электромагнитных расходомеров);

массовые (кориолисовы) расходомеры 34% (Micro Motion (модели датчиков ELIT, R, T, F, H, D, CNG) (Emerson Process Management) 49%, Optimass 2000/7000/9000 (KROHNE) 22%, PROMASS исполнение F/E (Endress+Hauser) 15% и расходомеры-счетчики массовые Sitrans F C Massflo Mass3000/Mass6000 (SIEMENS) 11% от общего количества массовых (кориолисовых) расходомеров); ротаметры 15%;

вихревые расходомеры 9% (Prowirl 72F/72W/73F/73W (Endress+Hauser) 51%, FS 4000/FV 4000 (ABB) 28%, YEFWLO серии DY (Yokogawa Electric) 21% от общего количества вихревых расходомеров);

турбинные расходомеры 2% (компаний «Рошар», Шлюмберже», «Метер-Флоу», «Турбоквант»);

ультразвуковые расходомеры 1% (FLUXUS ADM 6725/ Altometr/ PORTAFLOW 216/АКРОН 01);

расходомеры с другими принципами действия 1% (например, магнитно-индукционные расходомеры).

Несмотря на то, что рассмотренные средства учета энергоресурсов применяются уже не один десяток лет, их поверка и калибровка до настоящего времени вызывают определенные трудности и являются весомыми статьями затрат в процессе эксплуатации. Поэтому потребитель должен быть уверен в том, что средства учета расхода метрологически надежны на протяжении не только всего межповерочного интервала (МПИ), но и всего срока службы.

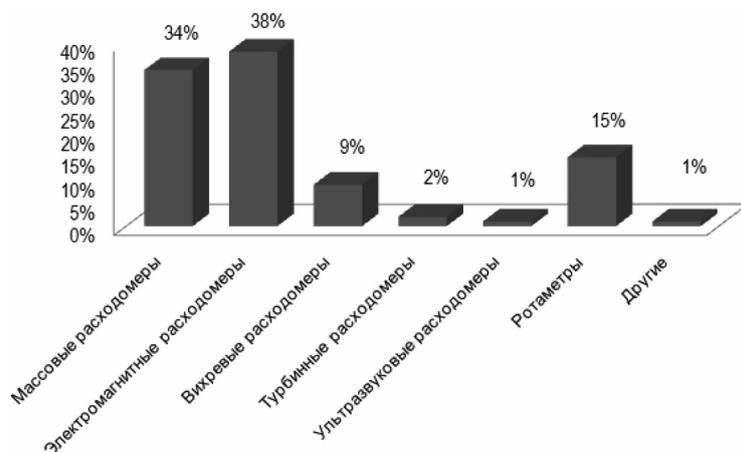


Рис. 1. Соотношение средств измерений расхода по используемому принципу измерений

Оценка метрологической надежности средств учета объемного и массового расхода. Одним из основных показателей качества средств измерений расхода является метрологическая надежность [4] – свойство измерений сохранять во времени метрологические характеристики в пределах установленных норм.

Метрологическая надежность определяется характером и темпом изменения нормируемых метрологических характеристик. Чем выше показатели метрологической надежности (вероятность работы без метрологического отказа, метрологический ресурс, интенсивность отказов и т. д.), тем реже приходится поверять средства измерений и тем меньший риск использования неисправного прибора в течение межповерочного интервала. Сведения о метрологической надежности средств измерений необходимы потребителю для правильной организации его метрологического обслуживания, а также назначения сроков очередной поверки или ремонта [5].

Наиболее точными, надежными, универсальными по совокупности эксплуатационных характеристик [6] и распространенными в Республике Беларусь являются электромагнитные расходомеры. Их показания практически не зависят от изменения физических свойств измеряемой среды (плотности, вязкости, электропроводности т. д.) [7] и незначительно зависят от распределения скорости потока в канале [6].

Характер изменения метрологических характеристик на примере электромагнитных расходомеров в межповерочном интервале представлен на рис. 2.

Проанализированы показания 20 однотипных электромагнитных расходомеров, поступивших на периодическую поверку после эксплуатации (МПИ 4 г.) на одном предприятии в схожих условиях окружающей и рабочей среды.

На рис. 2 изображена прямая усредненных показаний откалиброванного расходомера (1), которая находится в пределах допускаемой основной относительной погрешности $\Delta = \pm 0,2\%$ (2, 3).

Анализ показал, что 81% (количественная оценка) расходомеров не удовлетворяет требованиям по метрологической надежности: на практике основная относительная погрешность измерения превышает допускаемую на 0,62, 0,54 и 0,48% на 10, 50 и 90% номинального расхода – прямая усредненных показаний расходомера после эксплуатации (4).

Калибровка такого типа расходомеров, как правило, осуществляется при помощи настройки нулевой точки (zero) [7] и установки поправочного коэффициента (K -фактор).

K -фактор – коэффициент, выражающий соотношение между единицей объема пропускаемой жидкости (1 л) к объему, пропускаемому расходомером за один оборот:

$$V_R = \Delta V_R \cdot K_R, \quad (1)$$

где V_R – объем, прошедший через расходомер, ΔV_R – объем жидкости, отмеряемый за один оборот измерительного узла расходомера, K_R – количество оборотов, приходящееся на 1 л (1 м³ и т. д.) [8].

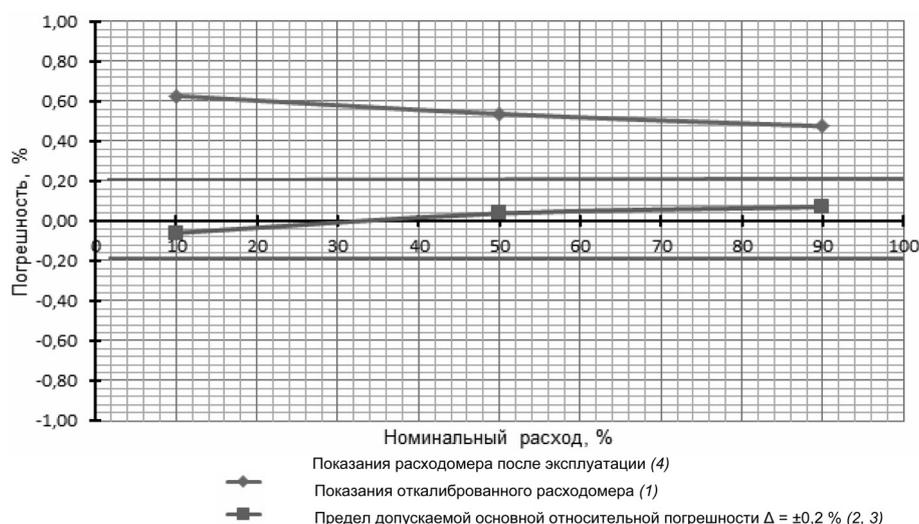


Рис. 2. Изменение метрологических характеристик электромагнитного расходомера

Проще говоря, K -фактор – множитель, используемый в расходомерах.

Все расходомеры после изготовления проходят этап калибровки и получают калибровочный сертификат, где указываются диапазон измерений расхода и средний поправочный коэффициент (K -фактор) для данного расходомера. Например, K -фактор задается в количестве импульсов, соответствующем конкретному объемному расходу (200 имп/л и т. д.)

Данный коэффициент используют для преобразования импульсного сигнала, пропорционального расходу, в технические единицы [9].

Основной причиной метрологического отказа у расходомеров является неучет условий эксплуатации, которые существенно влияют на измеряемую величину, параметры применяемых средств измерений расхода и деградацию измерительных каналов. Среди таких условий необходимо отметить аэрацию жидкости, пульсацию измеряемого расхода в реальных условиях, «зарастание» стенок трубопровода и др.

Установлено несанкционированное вмешательство оператора в работу средства измерений (в 54% расходомеров был изменен K -фактор), что противоречит требованиям технической и нормативной документации и приводит к искажению результатов. Тем не менее, когда расходомеру задавались настройки предыдущей поверки (паспортные «zero» и K -фактор), основная относительная погрешность измерения превышала предел допускаемой основной относительной погрешности. Поэтому в настоящее время актуальной для электромагнитных расходомеров остается проблема степени накопления нестабильности показаний расходомера на межповерочном интервале.

В процессе эксплуатации расходомеров важно гарантировать также соблюдение правил установки, корректную настройку нулевой точки и исключить вмешательство оператора в процесс функционирования приборов (изменение без надобности корректировочных и калибровочных коэффициентов).

На предприятиях Республики Беларусь, особенно в химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности, благодаря своим конструктивным особенностям, стабильности метрологических характеристик и возможности эксплуатации в агрессивных средах, без потери точности и стабильности показаний широко применяются массовые (кориолисовы) расходомеры, их доля рынка на текущий момент составляет 34%.

Насколько точно и надежно работают такие расходомеры в межповерочном интервале отражено на рис. 3.

Изменение конфигурации кривых (1, 2, 3) на рис. 3 во времени зависит от состояния поверочной среды и метрологических характеристик поверочной установки. С течением времени (МПИ 2 г.) существенных изменений в показаниях рассматриваемого расходомера не наблюдается. Все кривые

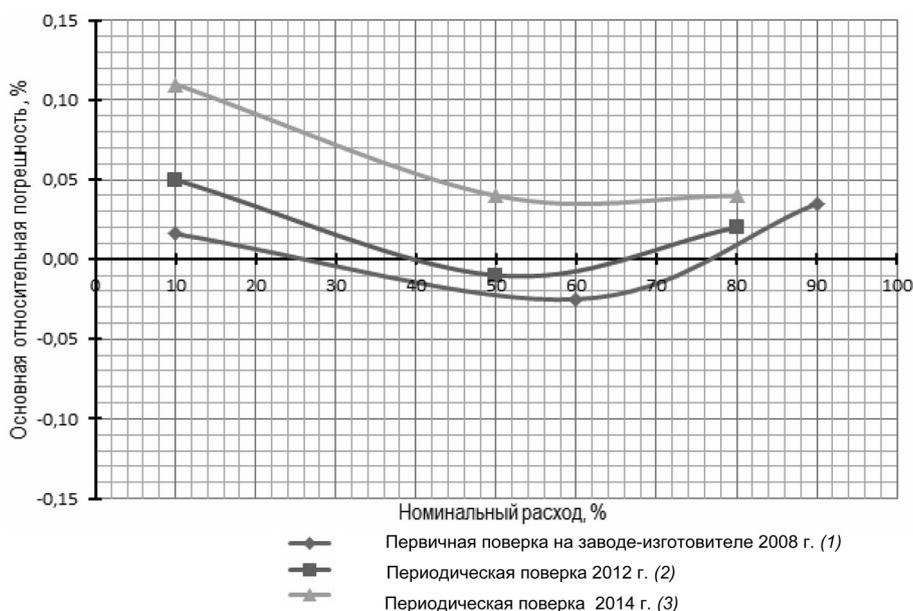


Рис. 3. Оценка метрологической надежности кориолисова массового расходомера во времени

(1, 2, 3) находятся в пределах допустимой основной относительной погрешности, которая определяется, как $\Delta = \pm 0,1\% \pm [(2,76/Q_{\max})100\%]$. Смещение первой точки на кривых (2, 3) обусловлено лишь измерением нулевой точки, которая настраивается оператором при каждой установке расходомера.

После настройки нулевой точки для сохранения качества измерений монтаж расходомера не должен претерпевать никаких изменений. Это означает, что после любых изменений в системе (монтаж / демонтаж датчика или изменение фактора калибровки) необходимо проводить повторную калибровку нулевой точки.

В массовых расходомерах фактор калибровки используется только для случаев, когда расходомер существенно завышает либо занижает показания. Исследования показали, что в 24% случаев существует необходимость подобных манипуляций, а именно при занижении показаний вводить погрешность измерений в процентах с положительным значением, а при завышении – погрешность с отрицательной величиной.

Для данного типа расходомеров правильно выбран межповерочный интервал, в пределах которого расходомер сохраняет свою метрологическую исправность.

При работе с любым массовым расходомером необходимо соблюдать общие принципы монтажа и корректно проводить настройку нулевой точки. Если при этом погрешность измерений имеет высокое значение, то настройка прошла некорректно по следующим причинам: имеет место протечка клапанов либо наличие газовых включений, либо имеются некоторые отложения на трубе.

Заключение. Разнообразие конструкций и типов расходомеров на рынке Республики Беларусь обусловлено постоянным совершенствованием методов и средств измерений расхода и количества вещества, а также стремлением к достижению высокой точности и метрологической надежности измерений.

На основании приведенной классификации и оценки метрологических характеристик выявлено, что наиболее перспективными в плане дальнейшей работы по повышению метрологической надежности являются электромагнитные и массовые расходомеры. Они наиболее распространены на территории Республики Беларусь (их доля на рынке составляет 38 и 34%) и обладают набором важных эксплуатационных характеристик и возможностью эксплуатации и в нормальных, и в экстремальных условиях.

Анализ результатов поверок в период 2008–2015 гг. показал, что межповерочный интервал для электромагнитных расходомеров, назначенный на основании требований действующих нормативных документов, является завышенным. Это приводит к снижению метрологической надежности таких расходомеров во времени и получению недостоверных результатов измерений на практике в процессе их эксплуатации на рабочих местах.

Список использованной литературы

1. Епанчинцева, О. М. Методы измерений и приборы: учебное пособие / О. М. Епанчинцева. – Кемерово: ОАО «КЕМПК», 2009. – 303 с.
2. Поиск по реестру СИ [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа: http://www.belgim.by/grsi_default – Дата доступа: 19.03.2015.
3. Кремлевский, П. П. Расходомеры и счетчики количества веществ. Справочник. Изд. 5-е переработ. и доп. под ред. Е. А. Шорникова / П. П. Кремлевский. – СПб.: Политехника, 2002. – 410 с.
4. РМГ 74–2004. Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений. – Введ. 2005-03-01. – М.: Стандартинформ, 2005. – 38 с.
5. Грубо, Е. О. Алгоритмическое обеспечение повышения метрологической надежности средств измерений: дис. ... канд. техн. наук / Е. О. Грубо. – СПб, 2011. – 137 с.
6. Акимова, О. Ю. Математическое моделирование влияния профиля скорости потока на сигнал электромагнитного расходомера / О. Ю. Акимова [Электронный ресурс]. – 2006. – Режим доступа: http://www.giab-online.ru/files/Data/2006/3/10_Akimova9.pdf. – Дата доступа: 11.03.2015.
7. Контрольно-измерительные приборы Endress+Hauser / ООО «Новосибирская электротехническая компания» [Электронный ресурс]. – 2005. – Режим доступа: http://catalog.novosibirsk.ru/index.php?page=kip_endress_hauser. – Дата доступа: 03.03.2015.
8. К-фактор – определение, область использования и расчет [Электронный ресурс]. – 2009. – Режим доступа: <http://ker-products.ru/flow-control-and-regulation/63-gde-primenjajut-summatori/332-k-factor-opredelenie-i-raschet.html>. – Дата доступа: 05.03.2015.
9. О погрешностях измерений расходомеров [Электронный ресурс]. – 2009. – Режим доступа: <http://darkont.ru/support/staty/o-tochnosti-raschodomerov>. – Дата доступа: 05.03.2015.

Поступила в редакцию 10.04.2015