

ВВЕДЕНИЕ. ДАТЧИКИ ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Датчик — прибор, предназначенный для преобразования измеряемой физической величины в величину, удобную для дальнейшего преобразования, измерения, использования. Это обязательный элемент измерительных приборов, систем контроля и регулирования и т. п. Принципы действия датчиков могут быть самыми разнообразными в зависимости от физической природы измеряемой величины, ее абсолютного значения, требуемой точности преобразования и т. п.

Уровень развития современных датчиков в значительной степени определяется достижениями в области физики, химии, физической химии, механики, радиотехники и других наук. Однако ключевое влияние на развитие характеристик и функциональности датчиков оказали достижения в области микропроцессорной техники. Современные датчики — многофункциональные приборы, наличие в составе которых микропроцессора позволяет им выполнять функции контроля и управления, традиционно присущие контроллерам. Кроме того, микропроцессорный преобразователь позволяет датчикам совершенствовать процесс измерения: повышать точность, увеличить надежность, оперативно изменять диапазон измерений, автоматически проверять результаты измерений и отбрасывать ошибочные значения, управлять дистанционно сенсором.

Также нельзя не отметить значимость развития технологий изготовления и обработки материалов, из которых сегодня выполняются чувствительные элементы датчиков. Применение новых материалов позволяет в ряде случаев повысить точность и чувствительность приборов, расширяет области их применения (сложные условия эксплуатации).

Перечислим основные функции, реализуемые современными датчиками:

- информационные — хранение в памяти архива измерений и информации о приборе;
- конфигурирование настроечных параметров;
- форматирование результатов измерений;
- преобразование электрического сигнала на выходе сенсора в значение заданного наименования единицы измерения;
- управляющие;
- коммуникационные — взаимодействие с другими средствами автоматизации по различным протоколам передачи данных, в том числе беспроводным;
- вычислительные — наличие микропроцессорного преобразователя позволяет выполнять существенную вычислительную обработку измеренных значений внутри прибора. Наличие вычислительной функции позволяет разрабатывать новые методы измерений, основанные на сложных вычислительных алгоритмах.

Области применения современных датчиков расширяются за счет возможности размещения в приборе нескольких сенсоров (многосенсорные датчики). Следующая значимая тенденция — встраивание датчиков в промышленное оборудование. Это полезно, например, при реализации различных методов мониторинга оборудования — по состоянию, на основе прогноза.

К перспективным направлениям развития датчиков следует отнести возможности самодиагностики и метрологического самоконтроля. Использование в датчиках программируемого микропроцессора позволяет рассмотреть процедуру поверки прибора и переложить ответственность за нее на само устройство. Самодиагностика подразумевает выполнение анализа работоспособности своего состояния в случае возникновения различных сбоев, а также выдачу соответствующих предупреждений оператору.

В последние годы мы много говорим о цифровой революции и технологиях, на которых она базируется. Industry 4.0 — переход на полностью автоматизированное цифровое производство, управляемое интеллектуальными системами в режиме реального времени в постоянном взаимодействии с внешней средой, выходящее за границы одного предприятия, с перспективой объединения в глобальную промышленную сеть вещей и услуг (www.tadviser.ru).

Значимым и стремительно развиваемым компонентом Industry 4.0 является промышленный Internet вещей, предоставляющий «вещам» возможность использовать преимущества остальных технологий цифровизации — облачных приложений, больших данных, современного алгоритмического обеспечения. В настоящее время производители промышленных датчиков уже выпускают изделия, соответствующие требованиям промышленного Internet вещей. В дальнейшем эта тенденция будет расширяться и укрепляться.

Среди технологий Industry 4.0 отметим периферийные вычислительные системы, характеризующиеся реализацией децентрализованной обработки данных, когда данные обрабатываются самим устройством, а не передаются в центр обработки. Наличие вычислительной функции и возможности подключения к Internet наделяет современный датчик функцией периферийных вычислений.

Подробную статью о современном состоянии и перспективах развития датчиков, применяемых на технологических производствах, читайте в апрельском номере журнала «Автоматизация в промышленности».

В настоящем номере представлены разработки отечественных производителей и исследователей, приведены примеры их использования.

Высокоточные измерения массы сжиженных углеводородных газов в транспортных емкостях

В.И. Терешин (ООО «Техносенсор»), А.С. Совлуков (ИПУ РАН)

Рассматриваются технические решения, обеспечивающие высокоточные измерения массы сжиженных углеводородных газов (СУГ) в транспортных емкостях при перевозке, а также при приеме и при отпуске. Предлагается новый подход к калибровке резервуаров с использованием СУГ в качестве рабочей среды.

Ключевые слова: сжиженный углеводородный газ, измерение, масса, калибровка резервуаров, измерительная система.

Введение

Сжиженные углеводородные газы производятся на нефтеперерабатывающих заводах и на газоконденсатных месторождениях. СУГ перевозят в железнодорожных цистернах объемом 54 и 85 м³, в цистернах газозовов объемом до 65 м³ и в морских 20-футовых танк-контейнерах объемом 25 м³. В железнодорожных цистернах СУГ перевозят на большие расстояния от места производства на газонаполнительные станции (базы хранения).

В цистернах газозовов и в танк-контейнерах СУГ довозят непосредственно до потребителей (автомобильные газозаправочные станции, газгольдер автономного газоснабжения, котельные) и отпускают по частям в соответствии с поданными заявками.

При отсутствии учета СУГ в транспортных емкостях появляется возможность несанкционированных сливов сжиженного газа и отпусках в количествах не соответствующим товарным накладным.

Количество светлых нефтепродуктов в транспортных емкостях можно определить с помощью линейки или метрштока, а для СУГ этот способ неприменим, потому что СУГ в емкостях находится под давлением до 1,6 МПа.

Точный и достоверный учет СУГ в транспортных емкостях имеет важнейшее значение во всей цепочке движения товара от производителя до конечного потребителя.

Для измерения массы СУГ в резервуарах наиболее часто используется косвенный метод статических измерений, при котором измеряют уровень и плотность СУГ, по градуировочной таблице вычисляют объем СУГ, массу СУГ вычисляют перемножением объема на плотность [1–3]. Измерительные системы, реализующие этот метод, не всегда обеспечивают необходимую точность из-за погрешностей каналов измерения плотности и недостаточно надежной работе поплавковых уровнемеров и плотномеров при низкой плотности жидкости. Плотность СУГ может изменяться 460...630 кг/м³.

Для высокоточных измерений количественных параметров СУГ в резервуарах разработаны радиочастотные методы и измерительные устройства [4–8]. Пря-

мой метод статических измерений массы СУГ с применением радиочастотных датчиков реализован в системе измерительной СУ-5 Д с датчиками ДЖС-7 М (варианты исполнения ДЖС-7 Мр и ДЖС-7m), гос. реестр СИ № 54787. Выходной параметр датчика ДЖС-7 М — общая масса СУГ, в том числе масса газообразной фазы СУГ.

Новая разработка — система измерительная СУ-5 Д-МАСС, которая обеспечивает эффективное решение задачи измерения массы различных сред не только в резервуарах, но и в трубопроводах.

Система измерительная СУ-5 Д-МАСС

Система измерительная СУ-5 Д-МАСС (рис. 1) предназначена для измерения массы различных жидких сред и газовых конденсатов в условиях их хранения в резервуарах и перекачки по трубопроводам, в том числе в транспортных емкостях. Обеспечивается измерение массы СУГ в резервуаре с помощью датчика ДЖС-7 Мр или ДЖС-7m и измерение массы отпущенного СУГ с помощью кориолисовых массометров на трубопроводах жидкости и газа (паров СУГ).

Система измерительная СУ-5 Д-МАСС для транспортных емкостей в минимальной комплектации содержит блок СБ-5 и датчик массы ДЖС-7 Мр или

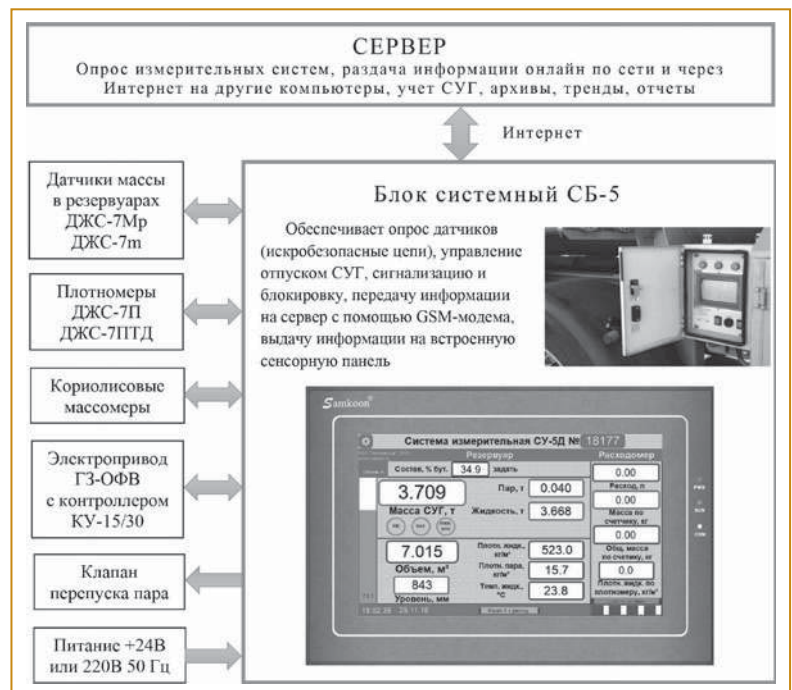


Рис. 1. Система измерительная СУ-5Д-МАСС

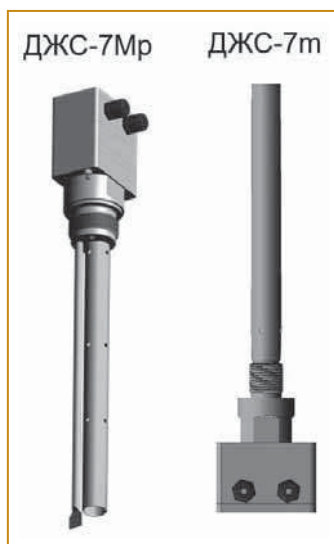


Рис. 2. Датчики массы СУГ

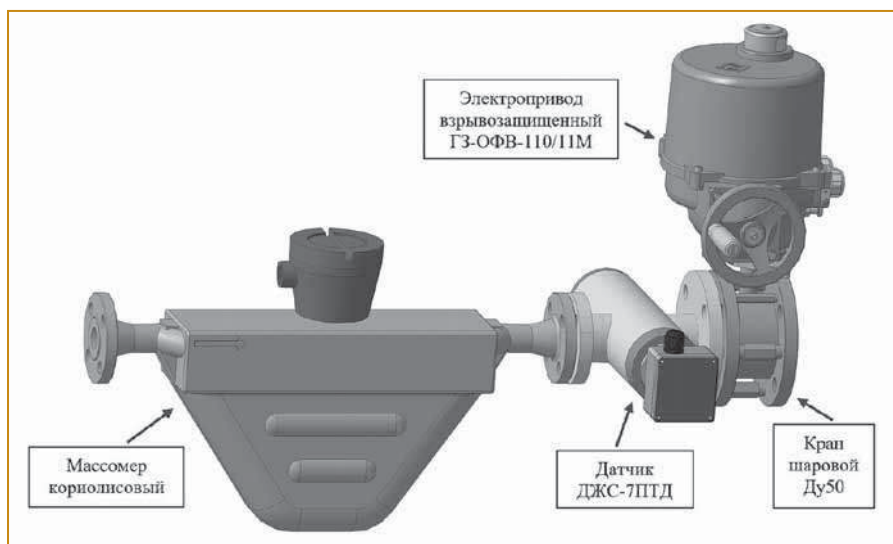


Рис. 3. Установка для измерения массы СУГ в трубопроводе

ДЖС-7м (рис. 2). Погрешность измерения общей массы СУГ (масса жидкости и масса газообразной фазы — паров СУГ) в транспортной емкости $\leq \pm 0,65\%$.

Системный блок СБ-5 имеет пылевлагозащищенное исполнение и может эксплуатироваться на улице, в нем размещаются блок искрозащиты ИЗК-3, GSM-модем, сигнальные лампочки, клеммники и источники питания.

Датчик ДЖС-7 Мр устанавливается на верхний лючок резервуара, датчик ДЖС-7м может устанавливаться как на верхний, так и на нижний лючок резервуара.

Измерение массы СУГ в резервуаре

Система СУ-5 Д-МАСС обеспечивает коммерческий учет запасов СУГ в резервуарном парке, а именно, измерение и вычисление следующих параметров: общая масса СУГ в резервуаре; масса жидкой фазы СУГ; масса пара СУГ (газообразная фаза); плотность жидкости; плотность пара; уровень СУГ; объем СУГ; температура (6 точек измерения); давление. Погрешность измерения общей массы СУГ (масса жидкости и масса пара) $\leq \pm 0,65\%$.

Для установки датчика ДЖС-7 Мр требуется один лючок Ду50. Подключение четырехпроводное, RS-485, искробезопасные цепи. Максимальная длина датчика 4500 мм. Датчики подключаются к блоку искрозащиты ИЗК-3 (до четырех датчиков одним кабелем, длина до 1000 м).

Датчик ДЖС-7м может устанавливаться на лючок Ду32. Этот датчик не измеряет давление и измеряет температуру в одной точке.

Все вычисления выполняются в блоке искрозащиты ИЗК-3, который располагается в системном блоке СБ-5. Информация выдается в ПЭВМ, на сенсорную панель и на другие устройства по стандартному протоколу Modbus. Автоматически определяется, какие датчики температуры находятся в жидкости, а какие в паре (над жидкостью) и вычисляются средняя температура пара и средняя температура жидкости.

В блоке искрозащиты имеется математическая модель емкости с СУГ, которая, используя измеренные значения общей массы СУГ, температуры жидкости, температуры пара СУГ, а также градуировочную таблицу резервуара и информацию о содержании бутана в СУГ, автоматически определяет и выдает массу жидкости, массу пара, плотность жидкости, плотность пара, уровень и объем СУГ.

Плотность паровой фазы СУГ вычисляется по формуле:

$$\rho = P/(K \times R \times T),$$

где P — давление, K — коэффициент сжимаемости, R — удельная газовая постоянная, T — температура пара.

Давление P измеряется. Коэффициент сжимаемости K вычисляется по таблице зависимости K от приведенной температуры (отношение измеренной температуры к среднекритической) и приведенного давления (отношение давления к среднекритическому). Среднекритические давление и температура вычисляются как функции от состава СУГ. Удельная газовая постоянная вычисляется как функция от состава СУГ.

По плотности и объему пара СУГ вычисляется масса пара СУГ. Масса жидкой фазы СУГ вычисляется вычитанием массы пара СУГ из измеренного значения общей массы СУГ. Плотность жидкой фазы СУГ вычисляется по таблице зависимости плотности СУГ от температуры и состава СУГ. Объем СУГ рассчитывается как частное деления массы жидкости на плотность. Уровень СУГ вычисляется по градуировочной таблице как функция от объема СУГ.

Все вышеприведенные вычисления выполняются автоматически без участия оператора. Все вычисления выполняются в контроллере блока искрозащиты ИЗК-3 (без участия ПЭВМ).

Состав СУГ вводится вручную в основном окне рабочей программы. Для определения состава СУГ

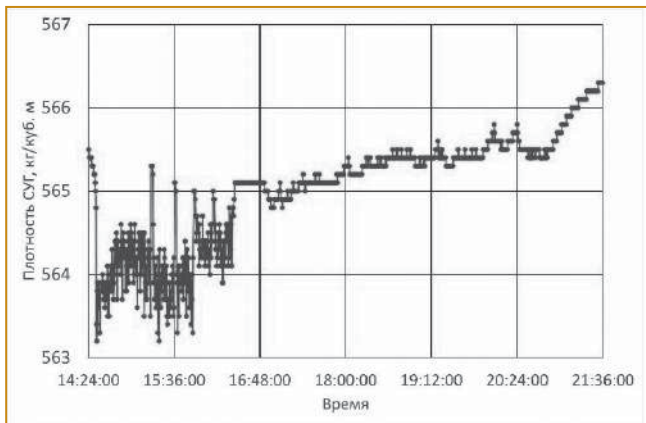


Рис. 4. Временной тренд слива СУГ через плотномер

(содержание бутана) можно использовать плотномер ДЖС-7 ПТД, устанавливаемый на трубопроводе.

Измерение массы СУГ в трубопроводе

Кориолисовый массомер для измерения массы СУГ в трубопроводе обычно ставят совместно с газоотделителем и дифференциальным клапаном, в противном случае возникают большие погрешности из-за кипения СУГ.

Предлагается инновационное техническое решение. Для измерения массы отпущенного с транспортной емкости или принятого в транспортную емкость СУГ используется кориолисовый массомер совместно с датчиком плотности ДЖС-7 ПТД и шаровым краном с электроприводом (рис. 3). За счет отсутствия газоотделителя и дифференциального клапана повышается надежность (нет механических деталей) и увеличивается скорость слива СУГ (обеспечивается работа с меньшим перепадом давления).

Датчик ДЖС-7 ПТД измеряет плотность, давление и температуру СУГ в трубопроводе и позволяет обеспечить режимы слива СУГ, при которых кипение гарантированно отсутствует.

Если в трубопроводе имеются несконденсированные пары СУГ, датчик ДЖС-7 ПТД покажет наличие кипения, и шаровой кран не откроется, пока пары не сконденсируются.

Определение микрокипения СУГ с помощью плотномера ДЖС-7 ПТД

На графике рис. 4 показан временной тренд слива СУГ через плотномер. В первые 2 часа соответствуют ручному режиму. Автоматическое регулирование расхода отключено, кран открывается и остается в определенном положении. Наблюдается кипение СУГ, при этом среднее значение плотности 564 кг/м³ (плотность уменьшилась на 0,2%). Это означает, что в СУГ присутствуют пузырьки пара, которые занимают объем 0,2% в среднем. Пузырьки пара распределяются неравномерно в трубопроводе, из-за этого показания имеют разброс ±1 кг/м³. Нестабильность показаний — признак кипения СУГ. В 16.30 включен режим автоматического регулирования расхода, кипение прекратилось. Измеренное значение плотности СУГ вернулось к значению, которое было перед началом слива, разброс показаний на ограниченном временном промежутке ≤ ±0,05%.

Отображение информации на сервере и на ПЭВМ на АГЗС

На сервере в режиме реального времени собирается информация от датчиков в резервуарах газозов и АГЗС. На графиках (рис. 5) канал 1 (серый) — масса СУГ на АГЗС. Канал 2 (черный) — масса СУГ в резервуаре газозова в зависимости от времени. На графике слева показаны тренды за 6 часов — с 12.00 до 18.00 часов, на графике справа — за 1,5 часа с 15.00 до 16.30 в увеличенном масштабе.

Выполнялась калибровка датчика ДЖС-7 Мр в резервуаре АГЗС по датчику ДЖС-7m в резервуаре газозова с дополнительным контролем по весам. Газовоз был заполнен СУГ и взвешен. В дегазированную емкость на АГЗС был выполнен слив 7900 кг СУГ. Потом газовоз поехал на весы, вернулся обратно, СУГ из резервуара АГЗС был перекачан обратно в газовоз, газовоз был взвешен еще раз.

Программное обеспечение позволяет делать выборки информации по любым измерительным каналам за любое время. Пример отчета по движению СУГ за определенный период времени показан на рис. 6.

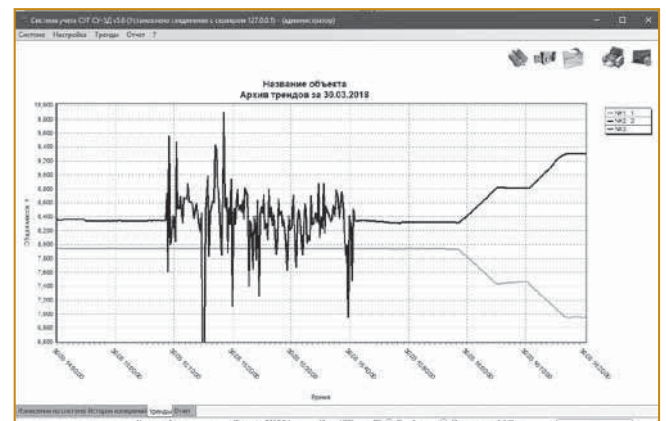
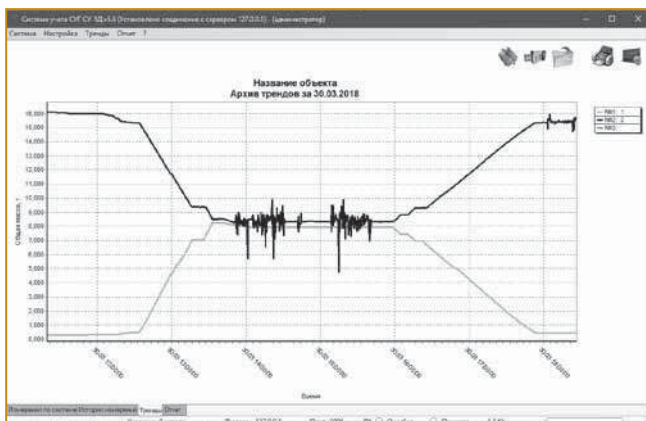


Рис. 5. Отображение информации на сервере и на ПЭВМ на АГЗС

АГЗС №1
Отчет по движению СУГ
с 01.06.2017 8:00:00 по 02.06.2017 8:00:00

| Емкость | Составные объемы | | | Составные массы жидкости | | | Составные массы пара | | | Составные общей массы | | |
|----------|------------------|----------|---------|--------------------------|----------|---------|----------------------|----------|---------|-----------------------|----------|---------|
| | Начальное | Конечное | Разница | Начальное | Конечное | Разница | Начальное | Конечное | Разница | Начальное | Конечное | Разница |
| СУ-5Д №1 | 3,685 | 0,463 | ⊖ 3,223 | 1,856 | 0,251 | ⊖ 1,605 | 0,098 | 0,139 | ⊕ 0,041 | 1,954 | 0,39 | ⊖ 1,564 |
| 2 канал | 8,997 | 6,902 | ⊖ 2,095 | 4,552 | 3,532 | ⊖ 1,02 | 0 | 0,034 | ⊕ 0,034 | 4,582 | 3,566 | ⊖ 0,986 |
| Итого: | 12,683 | 7,365 | ⊖ 5,318 | 6,408 | 3,783 | ⊖ 2,625 | 0,098 | 0,173 | ⊕ 0,075 | 6,536 | 3,956 | ⊖ 2,58 |

Рис. 6. Пример отчета по движению СУГ за определенный период времени

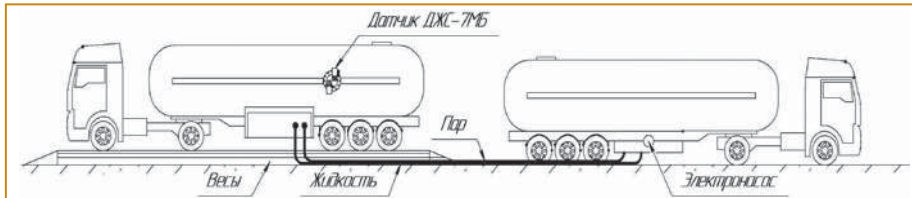


Рис. 7. Проверка датчика в резервуаре газовой цистерны с помощью весов

Калибровка и проверка датчика в резервуаре газовой цистерны

Необходимое условие для точных измерений — корректная градуировочная таблица резервуара. Калибровка датчика ДЖС-7 М или ДЖС-7m вместе с резервуаром, в котором он установлен, выполняется с помощью кориолисового массомера на газовой цистерне. Производится слив СУГ (если калибруется резервуар на газовой цистерне с массомером) или заполнение (если калибруется резервуар на другой газовой цистерне или на АГЗС) резервуара через массомер.

Калибровка производится при небольшой скорости перекачки СУГ без остановок. На сервер одновременно поступают результаты измерений с массомера и с датчика в резервуаре. При совместной обработке этих данных получаем новую градуировочную таблицу, которая записывается в блок искрозащиты ИЗК-3. Проверка датчика в резервуаре выполняется аналогично градуировке, только выполняются остановки перекачки в проверяемых точках.

Преимущества такого способа: не требуется дегазация резервуаров и вывод их из эксплуатации; калибровка и проверка проводятся в обычном режиме работы оборудования и не требуют много времени; присутствие поверителя на объекте во время проверки не требуется, потому что данные с массомера и с датчика в резервуаре в режиме реального времени поступают на сервер; программное приложение для сервера позволит автоматически формировать отчеты по результатам проверки; учитывается наклон цистерны газовой цистерны; учитывается фактическая привязка датчика к геометрии резервуара.

Проверка датчика в резервуаре газовой цистерны с помощью весов

Проверка датчика в резервуаре газовой цистерны может быть выполнена с помощью весов. Для этого газовой цистерны с поверя-

емым датчиком устанавливается на весы (рис. 7). Другой газовой цистерны (заполненный СУГ) необходимо подогнать, поставить рядом и соединить с газовой цистерной на весах шлангами по жидкой и паровой фазе. Один из газовой цистерны должен быть оборудован насосом. Производится перекачка СУГ и снятие показаний весов и датчика в резервуаре газовой цистерны. Перед проверкой должна быть произведена калибровка датчика в резервуаре газовой цистерны с помощью кориолисового массомера.

Заключение

Предлагаемые технические решения позволяют обеспечить высокоточный учет сжиженных углеводородных газов в транспортных емкостях. Датчики не содержат механических элементов, за счет этого обеспечивается их высокая надежность в тяжелых условиях эксплуатации и стойкость к загрязнениям.

Результаты измерений в режиме реального времени поступают на сервер, формируются архивы и отчеты по проведенным торговым операциям.

Список литературы

1. Гаузнер С.И., Кивилис С.С., Осокина А.П., Павловский А.Н. Измерение массы, объема и плотности. М.: Изд-во стандартов. 1982. 528 с.
2. Рачевский Б.С. Сжиженные углеводородные газы. М.: Нефть и газ. 2009. 640 с.
3. Зоря Е.И., Яковлев А.Л., Ларионов С.В. Определение массы сжиженных углеводородных газов при приеме, хранении и отпуске потребителям. М.: ООО «Издательский дом Недра». 2012. 197 с.
4. Sovlukov A.S., Tereshin V.I. Measurement of liquefied petroleum gas quantity in a tank by radio-frequency techniques // IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement. 2004. Vol. 53. N 4. P. 1255-1261.
5. Sovlukov A.S., Tereshin V.I. Radiofrequency technological measurements under pipeline transportation of liquefied petroleum gas // Proceedings of the XIX IMEKO World Congress. Lisbon, Portugal. 2009. P. 1298-1302.
6. Sovlukov A.S., Tereshin V.I. Radiofrequency measurement of liquefied petroleum gas mass in a reservoir // Proc. of the XX IMEKO World Congress. Busan, Republic of Korea, September 9-14. 2012. 6 p. Paper 390_F_P_TC7_94_1.
7. Совлуков А.С., Терешин В.И. Радиочастотный метод измерений количественных параметров сжиженных углеводородных газов в резервуарах // Измерительная техника. 2005. № 10. С. 68-71.
8. Совлуков А.С., Терешин В.И. Радиочастотные измерения массы сжиженного углеводородного газа в резервуаре // Датчики и системы. 2012. № 12. С. 41-45.

*Терешин Виктор Ильич — канд. техн. наук, генеральный директор ООО «Техносенсор»,
Совлуков Александр Сергеевич — д-р техн. наук, проф., главный научный сотрудник
Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН.
Контактный телефон +7 (812) 369-91-64.
E-mail: technosensor@yandex.ru*