

Интеллектуальная радиочастотная система измерения массы сжиженных углеводородных газов в резервуарах

А. С. Совлуков
Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва
sovlukov@yandex.ru

В. И. Терешин
ООО «Техносенсор», г. Санкт-Петербург
technosensor@yandex.ru

Аннотация. Рассматривается радиочастотный метод измерения массы сжиженных углеводородных газов (СУГ) в резервуарах с повышенной точностью. Описывается разработанная интеллектуальная измерительная система с радиочастотным датчиком, обеспечивающая текущий учет СУГ по массе, инвариантный к составу СУГ, с погрешностью не более $\pm 0,5$ % при реальных условиях хранения СУГ в резервуарах.

Ключевые слова: сжиженный углеводородный газ; масса; резервуар; измерение; датчик; радиочастотный

I. ВВЕДЕНИЕ

Для измерения массы сжиженных углеводородных газов (СУГ) в резервуарах наиболее часто используется косвенный метод статических измерений, при котором измеряется уровень и плотность, по градуировочной таблице вычисляется объем, масса вычисляется перемножением объема на плотность [1–3]. Если отойти от необходимости точного измерения плотности, то точность измерений массы можно существенно повысить.

Прямой метод статических измерений массы СУГ с применением радиочастотных датчиков реализован в системе измерительной СУ-5Д с датчиками ДЖС-7М, гос. реестр СИ № 54787-13 [4–7]. Выходной параметр датчика ДЖС-7М – общая масса СУГ, в том числе масса газообразной фазы.

Рассмотрим радиочастотный метод измерения общей массы СУГ, который характеризуется упрощенным процессом измерения массы и построение на его основе интеллектуальной радиочастотной системы измерения.

II. РАДИОЧАСТОТНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ МАССЫ СУГ

Средство измерения – интеллектуальная измерительная система, содержащая радиочастотный датчик – коаксиальный резонатор (цилиндрический конденсатор), заполняемый СУГ, шесть датчиков температуры, равномерно расположенных по длине радиочастотного датчика, электронный блок и регистратор. Чувствительный элемент датчика – сборка из двух цилиндрических электродов, пространство между которыми заполняется

контролируемой средой. Электронный преобразователь измеряет электрическую емкость датчика – емкость конденсатора, образованного электродами чувствительного элемента.

На рис. 1 показано размещение в резервуаре этого датчика, содержащего коаксиальный резонатор и измерительные преобразователи для определения температуры (6 шт.) Здесь H – уровень СУГ; L_1 – длина датчика; L – расстояние от края лючка до дна резервуара; $X_0 = L - L_1$ – расстояние от дна до нижнего конца датчика; L_0 – уровень СУГ при заполнении на 100 % объема; h – уровень заполнения датчика контролируемой средой; $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6$ – точки расположения измерительных преобразователей для определения температуры.

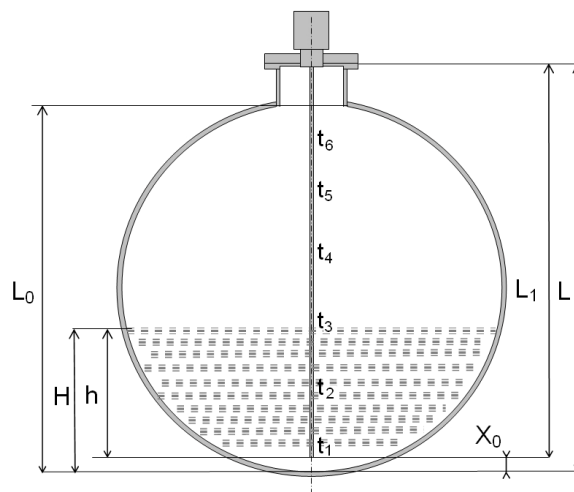


Рис. 1. Размещение датчиков в резервуаре

Сжиженные углеводородные газы являются диэлектриками, их диэлектрическая проницаемость зависит от состава СУГ и от температуры. Диэлектрическая проницаемость СУГ пропорциональна их плотности [8]. Следовательно, электрическая емкость датчика пропорциональна произведению уровня на плотность, радиочастотный датчик фактически является устройством для измерения массы СУГ.

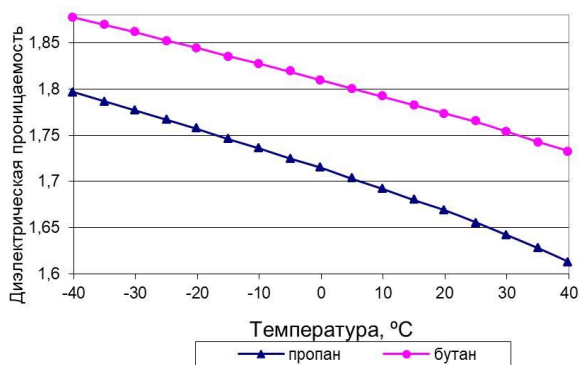


Рис. 2. Зависимости диэлектрической проницаемости пропана и бутана от температуры

На рис. 2 изображены графики зависимости диэлектрической проницаемости пропана и бутана от температуры. На рис. 3 отражены результаты моделирования температурной погрешности измерения массы СУГ в измерительной системе с радиочастотным датчиком, настроенным на измерение массы пропана: погрешности измерения массы пропана и массы бутана без температурной коррекции; погрешности измерения массы пропана и массы бутана с температурной коррекцией + 0,06 % на 1 °C (коррекция по температуре для пропана).

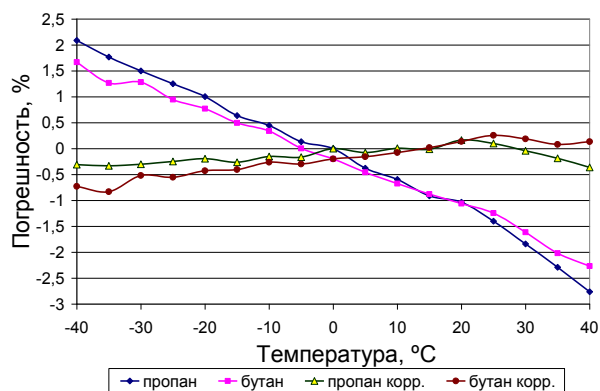


Рис. 3. Зависимости погрешности измерения массы СУГ в измерительной системе с датчиком, настроенным на измерение пропана, от температуры

Для построения графиков на рис. 3 диэлектрические проницаемости промасштабированы (приведены к значению плотности пропана при температуре 0 °C) умножением на коэффициент K , который пересчитывает диэлектрическую проницаемость в плотность и используется при необходимости для подстройки максимума:

$$K = \rho_{ж0}/(\epsilon_{ж0}-1),$$

где $\rho_{ж0} = 0,5297 \text{ г/см}^3$ – плотность пропана при 0 °C; $\epsilon_{ж0} = 1,7148$ – диэлектрическая проницаемость пропана при 0 °C; по умолчанию $K = 0,5297/(1-1,7148) = 0,7410$.

Погрешности измерения массы для каждой температуры вычислены как разница между промасштабированными значениями приращений диэлектрической проницаемости (плотность, по которой

работает датчик) и фактической плотностью (справочные данные), эта разность поделена на $\rho_{ж0} = 0,5297 \text{ г/см}^3$ (плотность пропана при 0 °C) умножена на 100 %.

Такая измерительная система может с погрешностью не более $\pm 0,5 \%$ измерять массу пропана и с погрешностью не более $\pm 1 \%$ измерять массу бутана (при настройке на измерение пропана, без учета погрешностей от неточного пересчета градуировочной таблицы).

Приращение C_s эквивалентной электрической емкости радиочастотного датчика, вызванное наличием в резервуаре жидкой и газовой фазы СУГ:

$$C_s = C_l[(\epsilon_{ж}-1) \times h + (\epsilon_{г}-1) \times (L - h)] \quad (1)$$

Здесь C_l – погонная (т.е. на единицу длины) электрическая емкость датчика; h – уровень жидкой фазы СУГ, заполняющей датчик; L – длина радиочастотного датчика; $\epsilon_{ж}$ – диэлектрическая проницаемость жидкой фазы СУГ; $\epsilon_{г}$ – диэлектрическая проницаемость газовой фазы СУГ.

Масса сжиженного газа в резервуаре определяется по формуле:

$$M = V \times \rho_{ж} + (V_0 - V) \times \rho_{г} \quad (2)$$

где V_0 – полный объем резервуара; V – объем жидкости в резервуаре; $\rho_{ж}$, $\rho_{г}$ – плотности жидкости и газа.

Или по формуле:

$$M = S \times [h \times \rho_{ж} + (L - h) \times \rho_{г}] \quad (3)$$

где S – средняя площадь сечения резервуара; L – высота резервуара; h – уровень жидкости.

Плотности жидкости и газа $\rho_{ж}$, $\rho_{г}$ пропорциональны приращениям диэлектрических проницаемостей жидкости и газа относительно диэлектрической проницаемости вакуума ($\epsilon_{ж}-1$), ($\epsilon_{г}-1$).

Диэлектрические проницаемости жидкой и газовой фаз пропана и бутана и их смесей, входящих в состав СУГ, рассчитываются, соответственно, по формулам:

$$\epsilon_{ж} = 1 + \rho_{ж}/[K \times (1 + T_s \times t)] \quad (4)$$

$$\epsilon_{г} = 1 + \rho_{г}/[K \times (1 + T_s \times t)] \quad (5)$$

где $K = \rho_{ж0}/(\epsilon_{ж0}-1) = 0,741 \text{ г/см}^3$; T_s – коэффициент температурной коррекции, $T_s = 0,0006$.

После подстановки формул (4) и (5) в формулу (1) и совместного преобразования формул (1) и (3) диэлектрические проницаемости и плотности сокращаются, получаем:

$$M = S \times C_s \times K \times (1 + T_s \times t)/C_l \quad (6)$$

Таким образом, общая масса СУГ в резервуаре при различных соотношениях массы $M_{г}$ газовой и массы $M_{ж}$ жидкой фазы и при различном компонентном составе определяется по формуле (6) и зависит только от приращения емкости датчика C_s и от температуры t .

Средняя площадь сечения резервуара S определяется делением объема на уровень и для вертикальных цилиндрических резервуаров это константа.

Для резервуаров иной формы или, в частности, для горизонтально расположенных цилиндрических резервуаров, средняя площадь сечения резервуара S задается в виде таблицы как функция от приращения емкости датчика C_s .

Коэффициент T_s устраняет температурную погрешность, которая составляет 0,06 % на 1 °С, это значительно меньше, чем температурный коэффициент изменения плотности сжиженных газов, который составляет 0,26 % на 1 °С.

III. СРЕДСТВО ИЗМЕРЕНИЯ

На рис. 2 приведена электрическая схема с радиочастотным чувствительным элементом, содержащем емкостный датчик с коаксиальным расположением его проводников и электронный блок. Устройство на этой схеме представляет собой автогенератор. Здесь радиочастотный коаксиальный чувствительный элемент служит частотозадающим элементом автогенератора 1. Помимо коаксиального датчика, электрическая схема содержит также индуктивность 2. Наличие нескольких диэлектрических опор, представляющих, в частности, тефлоновые диски, обеспечивает жесткое взаимное расположение внутреннего 3 и внешнего (металлической трубы) 4 проводников датчика. На рис. 4 показаны только две такие опоры 5 и 6. Они имеют сквозные отверстия для свободного прохождения жидкости. Например, эти опоры могут быть расположены на расстоянии 0,7 м друг от друга, как это имеет место в реальных конструкциях датчиков.

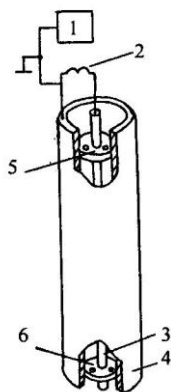


Рис. 4. Схема с радиочастотным чувствительным элементом 1 – автогенератор, 2 – индуктивность, 3 – внутренний проводник, 4 – металлическая труба, 5 и 6 – диэлектрические опоры

В электронном блоке данной интеллектуальной измерительной системы производится совместная функциональная обработка выходных сигналов всех, данного радиочастотного канала и измерительных каналов с указанными выше датчиками температуры, для определения количественных параметров СУГ.

Интеллектуальная система измерительная обеспечивает учет запасов СУГ в резервуарном парке, а именно

измерение следующих параметров: общая масса СУГ в резервуаре; масса СУГ; масса пара (газообразная фаза СУГ); плотность жидкой фазы СУГ; плотность паровой фазы СУГ; уровень СУГ; объем СУГ; температура; давление (дополнительная опция). Общая масса СУГ и температура измеряются, остальные параметры получают расчетным путем с использованием таблиц плотностей для различных компонентных составов СУГ при различных температурах.

IV. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА С РАСШИРЕННЫМИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ

Вышеописанный датчик измеряет два параметра СУГ в резервуаре – общую массу и температуру.

Рассмотрим техническое решение, которое при небольшой доработке датчика (введение канала измерения давления) позволяет повысить точность измерения массы и обеспечить вычисление и выдачу всех параметров сжиженного газа в резервуаре, а именно: общая масса СУГ, масса жидкости, масса пара, объем, уровень, плотность жидкости, плотность пара, температура жидкости, температура пара, давление.

Рассмотрим алгоритмы работы датчика ДЖС-7Мр, в котором имеется канал измерения емкости, канал измерения давления и шесть каналов измерения температуры, а также вводится состав СУГ (содержание этана, пропана и бутана).

Принцип работы остается тот же (измерение общей массы по формуле (6)), но выполняются цепочки промежуточных расчетов. Вычислительные операции контроллера в этом случае невозможно описать одной формулой, поэтому они разделены на 6 математических блоков.

Блок-схема интеллектуальной измерительной системы, в которой производится необходимые вычислительные операции, приведена на рис. 3.

Исходные данные, поступающие в контроллер:

Приращение электрической емкости датчика C_s – измеряется. Температура в резервуаре, 6 сенсоров, размещенных равномерно по высоте резервуара – измеряется. Давление – измеряется. Состав газа (содержание бутана) – вводится из поставочных документов.

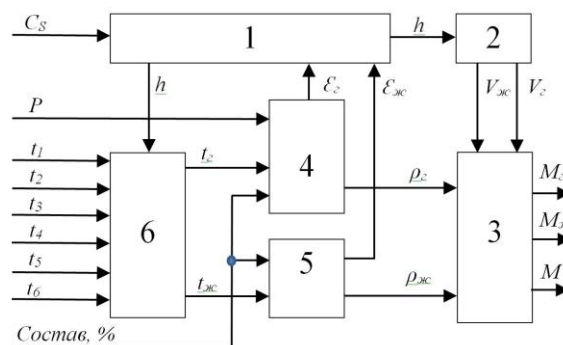


Рис. 5. Измерительная система повышенной точности

V. МОДИФИКАЦИЯ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ МАССЫ СУГ. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ

В блоке (1) преобразуется формула (1) и определяется уровень h . В блоке (2) по градуировочной таблице резервуара рассчитывается объем жидкости $V_{ж}$ и объем газа над жидкостью $V_{г}$. В блоке (3) по формуле (2) рассчитываются масса жидкости, масса газа и общая масса продукта в резервуаре. В блоке (4) рассчитываются плотность и диэлектрическая проницаемость газа в зависимости от давления, температуры газа и состава.

Плотность газа рассчитывается в соответствии с требованиями ГОСТ Р 56851-2016 по формуле:

$$\rho = P / (B \times R \times t_r) \quad (7)$$

где P – давление, t_r – температура газа, R – удельная газовая постоянная, B – коэффициент сжимаемости.

$$R = N_{et} \times 271 + N_{pr} \times 185 + N_{bt} \times 140 \quad (8)$$

где N_{et} , N_{pr} , N_{bt} – содержание этана, пропана и бутана в жидком СУГ. Состав газа задается в соответствии с поставочными документами.

Коэффициент сжимаемости B определяется по таблице в зависимости от приведенных давления и температуры.

Приведенное давление (отношение давления газа к давлению в критическом состоянии):

$$P_{pr} = P / (N_{et} \times 4,82 + N_{pr} \times 4,21 + N_{bt} \times 3,73) \quad (9)$$

Приведенная температура (отношение газа к его температуре в критической точке):

$$T_{pr} = T / (N_{et} \times 305 + N_{pr} \times 370 + N_{bt} \times 425) \quad (10)$$

В блоке (5) рассчитываются плотность и диэлектрическая проницаемость жидкости в зависимости от температуры и состава по таблице зависимости плотности жидкости от температуры и состава СУГ.

Диэлектрические проницаемости жидкости и газа рассчитываются не по формулам (4), (5), а по уравнению Клаузиуса-Моссоти:

$$\rho = [3 \times (\epsilon - 1) / (\epsilon + 2)] \times [m / (4 \times \pi \times N_A \times \alpha)] \quad (11)$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость вещества; m – молекулярная масса; N_A – число Авогадро; α – поляризуемость вещества.

Введем обозначение:

$$J = 3 \times m / (4 \times \pi \times N_A \times \alpha) \quad (12)$$

После подстановки (12) в (11) и преобразования получим:

$$\epsilon = 1 + [3 \times \rho / (J - \rho)] \quad (13)$$

Формула (13) показывает связь между диэлектрической проницаемостью ϵ и плотностью ρ вещества независимо от температуры.

В блоке (6) рассчитываются температура жидкости и температура газа в зависимости от уровня заполнения резервуара. Датчики температуры, которые находятся на границе раздела жидкости и газа, исключаются из

расчетов. По остальным датчикам вычисляется среднее значение температуры жидкости и температуры газа.

При включении измерительной системы в блоке (6) нет возможности точно рассчитать значения температуры жидкости и газа, потому что неизвестно точное значение уровня. Из-за неточного расчета температуры могут возникнуть погрешности вычисления уровня и объема. Начиная со второго измерения все параметры рассчитываются точно.

Преимущества интеллектуальной измерительной системы:

- рассчитываются и выдаются все параметры, характеризующие состояние сжиженного газа в резервуаре: общая масса СУГ, масса жидкости, масса пара, объем, уровень, плотность жидкости, плотность пара, температура жидкости, температура пара, давление;
- плотность пара измеряется и рассчитывается в соответствии с требованиями ГОСТ Р 56851-2016;
- калибровочная таблица имеет удобный стандартный формат – зависимость объема от уровня заполнения резервуара;
- диэлектрические проницаемости жидкости и газа рассчитываются не по приближенным формулам (4), (5), а по уравнению Клаузиуса-Моссоти;
- температура жидкости газа $t_{ж}$ и температура газа t_r определяются по точному алгоритму с учетом уровня СУГ в резервуаре.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная интеллектуальная радиочастотная измерительная система позволяет обеспечить измерение массы СУГ в резервуарах, с обеспечением инвариантности к его составу, с погрешностью не более $\pm 0,5 \%$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Гаузер 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 Недр». 2012. 197 с.
- [4] Sovlukov A.S., Tereshin V.I. Measurement of liquefied petroleum gas quantity in a tank by radio-frequency techniques // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2004. V. 53. No. 4. P. 1255-1261.
- [5] Совлуков А.С., Терешин В.И. Радиочастотный метод измерений количественных параметров сжиженных углеводородных газов в резервуарах // Измерительная техника. 2005. № 10. С. 68-71.
- [6] Совлуков А.С., Терешин В.И. Измерение количества сжиженного углеводородного газа в резервуаре // Измерительная техника. 2006. № 2. С. 40-42.
- [7] Совлуков А.С., Терешин В.И. Радиочастотные измерения массы сжиженного углеводородного газа в резервуаре // Датчики и системы. 2012. № 12. С. 41-45.
- [8] Богородицкий Н.П., Волокобинский Ю.М., Воробьев А.А., Тареев Б.М. Теория диэлектриков. М.-Л., Энергия. 1965. 344 с.