

DOI 10.15589/jnn20150311
УДК 681.518:620.262
3-59

INFORMATION EFFICIENCY COMPARISON OF POLYMETRIC
AND TRADITIONAL MEASUREMENT AND COMPUTING COMPLEXES

СРАВНЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ПОЛИМЕТРИЧЕСКИХ И ТРАДИЦИОННЫХ
ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Oleksii V. Zivenko

av@zivenko.com.ua

ORCID: 0000-0002-1539-8360

А. В. Зивенко

канд. техн. наук, и.о. доц.

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев

Abstract. The application of different criteria for comparative analysis of polymetric and traditional measurement and computing complexes (MCC) have been discussed. The research aim is the development of a technique and comparative analysis of traditional and polymetric MCC which are equivalent by the number of estimated parameters. The review of the MCC efficiency criteria is represented. The amount of the information from the MCC is used as the main comparison criterion. By the example of the MCC for controlling the LPG parameters, it was shown that the information efficiency of the polymetric MCC is higher by more than 1.5 times than the traditional architecture MCC. The technique for controlling the LPG parameters is developed. Based on the polymetric signal, it enables estimating the main parameters of LPG storing without any information from additional measurement channels. The obtained equations allow estimating the LPG parameters depending on the temperature, components concentration and pressure in the tank. They can be used as basic equations for MCC.

Keywords: measurement; polymetric system; measurements efficiency; information; entropy; liquefied petroleum gas.

Аннотация. Проведено сравнение эффективности полиметрического и традиционного информационно-измерительных комплексов на базе применения критерия количества информации. Разработана методика контроля параметров сжиженного газа без привлечения информации от дополнительных измерительных каналов.

Ключевые слова: измерение; полиметрическая система; эффективность измерений; информация; энтропия; сжиженный углеводородный газ.

Анотація. Проведено порівняння ефективності поліметричного й традиційного вимірювально-обчислювальних комплексів на базі застосування критерію кількості інформації. Розроблено методику контролю параметрів скрапленого газу без використання інформації від додаткових вимірювальних каналів.

Ключові слова: вимірювання; поліметрична система; ефективність вимірювань; інформація; ентропія; скраплений вуглеводневий газ.

REFERENCES

- [1] Zhukov Yu. D. *Polimetricheskie sistemy: teoriya i praktika: Monografiya* [Polymetric systems: Theory and Practice: Monograph]. Nikolaev, Atoll Publ., 2012. 382 p.
- [2] Zhukov Yu. D., Zivenko A. V., Vinogradov A. L. *Nekotorye algoritmicheskie metody povysheniya tochnosti polimetricheskikh izmereniy* [Some algorithmic methods for improving the accuracy of polymetric measurements]. *Vestnik RGRU — Bulletin of RSRTU*, 2013, issue 43, no. 1, pp. 113–116.
- [3] Kuzmin I. V., Kedrus V. A. *Osnovy teorii informatsii i kodirovaniya* [Basics of information and coding theory]. Kyiv, High School Publ., 1986. 238 p.
- [4] Preobrazhenskiy N. Y. *Szhizhennye uglevodorodnye gazy* [Liquefied petroleum gases]. Leningrad, Nedra, 1975. 279 p.
- [5] Rachkov M. Yu., Grishin M. P. *Fizicheskie osnovy izmereniy: uchebnoe posobie* [Physical basics of measurements: Study guide]. Moscow, MSMI Publ., 2007. 160 p.

- [6] Sovlukov A. S. Izmerenie obshchey massy szhizhennogo uglevodorodnogo gaza v rezervuare s primeneniem radiochastotnogo datchika [Measurement of the total mass of liquefied petroleum gas in the tank using a radio-frequency transmitter]. *Materialy XII vserossiyskogo soveshchaniya po problemam upravleniya VSPU-2014 (16.06. – 19.06.2014) — Materials of the XII All-Russian meeting on the control problems*. Moscow, 2014, pp. 7067–7075.
- [7] Shennon K. *Raboty po teorii informatsii i kibernetike* [Works on information theory and cybernetics]. Moscow, Foreign Literature Publ., 1963. 830 p.
- [8] Keszthelyi A. How to measure an information system's efficiency. 7-th International conference on management, enterprise and benchmarking (05.06. – 06.06.2009). Budapest, 2009, pp. 213–219.
- [9] Tifenn Rault, Abdelmajid Bouabdallah, Yacine Challal. Energy efficiency in wireless sensor networks: a top-down survey. *Computer Networks*, vol. 67, 2014, pp. 104–122.
- [10] Younglove B. A., Ely J. F. Thermophysical properties of fluids. II. Methane, Ethane, Propane, Isobutane and Normal Butane *The Journal of Physical and Chemical Reference Data (JPCRD)*, 1987, vol. 16, no. 4, pp. 577–796.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

На протяжении большей части истории наивысшие достижения человека были связаны с познанием мира через измерения. Результат измерения — конкретное значение физической величины, использование которого приводит к уменьшению неопределенности за счет получения части информации о текущем значении величины, которое характеризует один из аспектов состояния наблюдаемого объекта в данный момент времени. Сигналы современных сенсоров несут информацию одновременно о нескольких параметрах исследуемого объекта. Основываясь на специальных приемах и знаниях об объекте измерений, удастся получать мгновенные оценки нескольких параметров объекта без применения большого количества сенсоров (полиметрические системы), делать прогнозы, оценивать вероятности возникновения тех или иных событий и т. п. [1]. Возникает вопрос сравнения эффективности полиметрических измерительно-вычислительных комплексов (ИВК) и традиционных. Важной задачей является сравнительная оценка эффективности перспективных и существующих полиметрических и традиционных ИВК, выбор соответствующих критериев эффективности и методик их оценки.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Эффективность ИВК в зависимости от выполняемых задач и целей оценки может оцениваться различными методами [1, 3, 5, 8, 9]. Соотношение полезного эффекта, полученного в результате измерений, и затрат, произведенных на его проведение, определяет эффективность измерений. Широкое распространение получили методы оценки экономической эффективности внедрения и использования средств измерений. Кроме того, одним из важнейших критериев при сравнении ИВК могут выступать параметры точности. Для сравнения ИВК также используют критерии надежности, энергетической эффективности (особенно для распределенных автономных беспроводных

сетей сенсоров и устройств обработки данных), производительности применяемых алгоритмов и средств обработки и т. д. С точки зрения сравнения полиметрических и традиционных ИВК, одним из наиболее показательных критериев оценки эффективности есть критерий количества информации, которое может быть получено в результате их работы.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — разработка методики сравнительного анализа информационной эффективности полиметрических и традиционных ИВК; проведение сравнительного анализа ИВК традиционной архитектуры и полиметрического ИВК, эквивалентных по числу оцениваемых параметров.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Сравнительная оценка эффективности измерительных комплексов может быть упрощенно проиллюстрирована на примере ИВК, контролирующего состояние некоторого объекта, например, емкости со сжиженным газом. Сжиженный под давлением газ (СПГ) в баллонах, цистернах и резервуарах находится в двухфазном состоянии: часть смеси в жидком состоянии, часть — в газообразном (рис. 1).

Представим емкость с сжиженным под давлением газом СПГ в виде некоторой системы s' , т. е. единым набором параметров некоторой эмпирической системы, определяемой совокупностью ее компонентов:

$$s' = s'\{P, T_{ж}, T_{п}, X_{ж}, R_{п}, h_{ж}, V_{ж}, V_{п}, m_{ж}, m_{п}\}.$$

Контролю подлежат следующие параметры состояния системы s' : давление в емкости P , температура жидкой $T_{ж}$ и паровой фаз $T_{п}$, уровень заполнения емкости $h_{ж}$, объем жидкой $V_{ж}$ и паровой фаз $V_{п}$, соответствующие массы $m_{ж}, m_{п}$, концентрация компонентов в жидкой и паровой фазах соответственно — $X_{ж}, R_{п}$.

Предположим, что СПГ является смесью всего двух компонентов: пропана и бутана, молярная доля пропана в жидкой фазе — x_1 , доля бутана в жидкой фазе — x_2 ($x_2 = 1 - x_1$). Очевидно, что многие описанные выше параметры взаимосвязаны друг с другом, например, масса жидкой/паровой фазы и уровень жидкости в резервуаре:

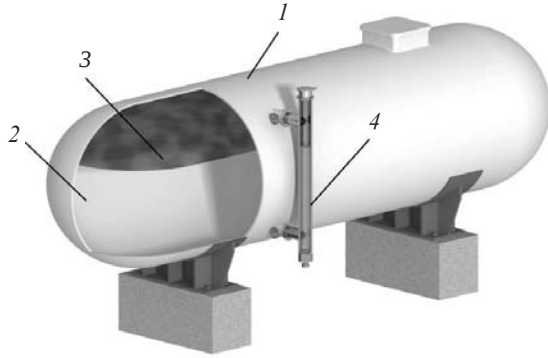


Рис. 1. Емкость для хранения сжиженного под давлением газа с выносной трубой для подключения контрольно-измерительной аппаратуры:

1 — газовая емкость для хранения СПГ; 2 — жидкая фаза СПГ; 3 — газообразная фаза СПГ; 4 — выносная труба сосуда, сообщаемого с основной емкостью, для работы с различным оборудованием (например, для установки датчиков уровня и температуры)

$$\begin{cases} m_{\text{ж}} = \rho_{\text{ж}}(T_{\text{ж}}, X_{\text{ж}}) \cdot V_{\text{ж}}(G_T, h_{\text{ж}}) \\ m_{\text{п}} = \rho_{\text{п}}(T_{\text{п}}, R_{\text{п}}) \cdot (V_0 - V_{\text{ж}}) \end{cases}$$

где G_T — геометрическая модель емкости, в которой находится СПГ (тарировочные таблицы); $\rho_{\text{ж}}$, $\rho_{\text{п}}$ — плотности жидкой и паровой фаз СПГ, V_0 — объем контролируемого резервуара.

Исключая взаимные связи между контролируемыми параметрами, однозначно охарактеризовать состояние системы s' можно с помощью набора следующих параметров:

$$s\{P, T_{\text{ж}}, T_{\text{п}}, Y_{\text{ж}}, Y_{\text{п}}, h_{\text{ж}}\}.$$

Соответствующая информация о среде (метаянформация), алгоритмы ее применения позволяют перейти от s к s' (вычислить весь набор требуемых параметров: объемы, плотности и массы паровой и жидкой фаз).

Контролируемой системе s присущ некоторый уровень разнообразия, который определяется множеством возможностей ее пребывания в различных состояниях. Эту степень разнообразия можно описать, задавая таблицу вероятности нахождения системы в каждом из возможных состояний:

s_1	s_2	...	s_N
p_1	p_2	...	p_N

где s_i — возможное состояние системы; p_i — вероятность того, что система будет находиться в этом состоянии; N — число возможных состояний системы.

Как мера разнообразия для множества возможных состояний системы используется понятие энтропии — математического ожидания логарифма вероятности пребывания системы s в состоянии s_i и соответствует введенной К. Шенноном в теории информации [7] «степени неопределенности»:

$$H = -\sum_{i=1}^N p_i \log_2 p_i,$$

где N — число возможных состояний системы; p_i — вероятность нахождения системы в состоянии s_i .

Шенноновское понятие энтропии можно использовать для оценки количественной меры измерительной информации:

$$I = H(S) - H'(S),$$

где I — количество информации, получаемое в результате одной операции измерения; $H(S)$ — энтропия системы S до поступления измерительной информации (априорная энтропия); $H'(S)$ — энтропия системы S после поступления измерительной информации (апостериорная энтропия).

Для оценки начальной энтропии необходимо задать начальные условия и ограничения (априорная информация):

1. Положим, что в контролируемом резервуаре находится смесь из двух компонентов: пропана и бутана. При этом молярная доля пропана в жидкой фазе x_1 может изменяться от $x_{1\min} = 0$ до $x_{1\max} = 1$. Доля пропана/бутана контролируется с шагом $\delta x_1 = 0,01$.

2. Система пребывает в состоянии термодинамического равновесия ($T_{\text{п}} \approx T_{\text{ж}}$).

3. Температура смеси колеблется в пределах от $T_{\min} = -50$ до $T_{\max} = +50$ °C и должна контролироваться с шагом $\delta T = 1$ °C.

4. Уровень жидкости в резервуаре может изменяться от $h_{\min} = 0$ до $h_{\max} = 3000$ мм и подлежит контролю с шагом $\delta h = 1$ мм.

5. Давление в емкости в состоянии термодинамического равновесия определяется составом газа и его температурой (может быть вычислено по табличным данным или эталонным кривым [4]) и должно контролироваться с шагом $\delta P = 0,01$ МПа.

Тогда в первом приближении число возможных состояний N_{s1} вычисляется по следующему выражению:

$$N_{s1} = \left(\frac{L_{\max} - L_{\min}}{\delta L} + 1 \right) \left(\frac{x_{1\max} - x_{1\min}}{\delta x_1} + 1 \right) \times \sum_{i=1}^{\frac{T_{\max} - T_{\min}}{\delta T} + 1} \left[\frac{P_1^{\text{упр}}(T_{\min} + \delta T \cdot i) - P_2^{\text{упр}}(T_{\min} + \delta T \cdot i)}{\delta P} \right],$$

где $P_1^{\text{упр}}$, $P_2^{\text{упр}}$ — упругости паров пропана и бутана при i -ом значении температуры соответственно (известная информация о свойствах сред).

Считая все состояния системы равновероятными и учитывая поставленные ограничения, $N_{s1} = 1,42 \cdot 10^9$, $H = 30,403$.

Традиционно в ИВК используют приборы, предназначенные для измерения «своей» физической величины. В приведенной задаче применяют уровнемер, термометры для измерения температуры СПГ, датчик давления в емкости и приборы для контроля состава газа, каждый из которых обладает своей погрешностью (неопределенность измерений).

Предположим, используемые приборы имеют следующие характеристики (табл. 1).

Тогда после каждого измерения ИВК получает некоторое количество информации, которое можно оценить с помощью приведенных выше выражений.

Например, после измерения температуры с принятой неопределенностью количество возможных состояний системы будет:

$$\left\{ \begin{aligned} N_{s2} &= \frac{L_{\max} - L_{\min} + 2u_L}{\delta L} \frac{x_{1\max} - x_{1\min} + 2u_{x1}}{\delta x_1} \times \\ &\times \sum_{i=1}^{N_T} \frac{P_1^{\text{упр}}(T + \delta T \cdot i) - P_2^{\text{упр}}(T + \delta T \cdot i)}{\delta P}, \\ N_T &= \left\lceil \frac{(T + u_T) - (T - u_T)}{\delta T} + 1 \right\rceil = \left\lceil \frac{2 \cdot u_T}{\delta T} + 1 \right\rceil \end{aligned} \right.$$

где N_T — количество температурных сечений общего пространства состояний при указанном результате текущего измерения T и неопределенности результата u_T .

В указанном случае количество возможных состояний $N_{s2} = 3,307 \cdot 10^7$, $H(N_{s2}) = 24,979$.

Таким образом, количество информации, полученное в результате измерения температуры и применения знаний о связи температуры газа и давления паров:

$$I = H(N_{s1}) - H(N_{s2}) = 30,403 - 24,989 = 5,414.$$

Важно отметить, что в приведенных выражениях фигурируют зависимости давления насыщенных паров от температуры (дополнительная информация), которые также «ограничивают» число возможных состояний.

Аналогично после измерения всеми приборами с указанным уровнем неопределенности получим $N_{s3} = 81$, $H(N_{s3}) = 6,34$.

Таким образом, информационный эффект применения построенного ИВК (снижение неопределенности) составит:

$$I = H(N_{s1}) - H(N_{s3}) = 30,403 - 6,34 = 24,063.$$

В состав полиметрических ИВК включены специальные датчики, основной особенностью которых является использование одного измерительного канала для измерения нескольких физических величин. Для указанной задачи применяются датчики для сжиженного газа, рассчитанные на работу при повышенном давлении до 2,5 МПа и температуре от -50 до $+70$ °С. Конструкция такого датчика представляет собой волновод специальной конструкции, который помещается в резервуар с сжиженным газом. Полиметрический метод измерений базируется на формировании полиметрического сигнала и его интерпретации с целью оперативной оценки множества характеристик контролируемого объекта. Процесс формирования импульсного полиметрического сигнала включает: генерацию коротких электромагнитных импульсов (длительностью 0,5...10 нс, амплитудой 1...10 В), контактное зондирование этими импульсами исследуемой жидкости путем их излучения в частично погруженный в эту среду полиметрический преобразователь специальной конструкции, прием, первичную обработку совокупности излученных и отраженных импульсов, интерпретацию полученных сигналов для оценки требуемых характеристик контролируемой среды.

В случае, когда используется классические двухпроводные/однопроводные линии с реперными отражателями, полиметрическим сигналом будет совокупность отражений от неоднородностей волнового сопротивления при зондировании импульсом определенной формы. Волновое сопротивление зависит как от геометрических размеров волновода, так и от его диэлектрического заполнения. Соответственно неоднородности волнового сопротивления возникают в местах резкого изменения геометрических размеров волновода (например, специально создаются реперные отражатели) или в местах изменения диэлектрической проницаемости среды, заполняющей пространство между волноводами датчика (разделы фаз).

Для пояснения процесса формирования полиметрического сигнала на рис. 2, а) представлен полиметрический датчик внутри резервуара с СПГ:

Таблица 1. Используемые средства измерения и их характеристики

Прибор	Диапазон измерения	Неопределенность, $P = 0,95$
Датчик давления	$DP = 0 \dots 1,6$ МПа	$u_p = \pm 0,5\% = \pm 0,008$ МПа
Термометр	$DT = 50 \dots 125$ °С	$u_T = \pm 1,5$ °С
Уровень	$DL = 0 \dots 3000$ мм	$u_L = \pm 1$ мм
Измеритель концентрации	$DX_1 = 0 \dots 100\%$	$u_{x1} = \pm 1\%$

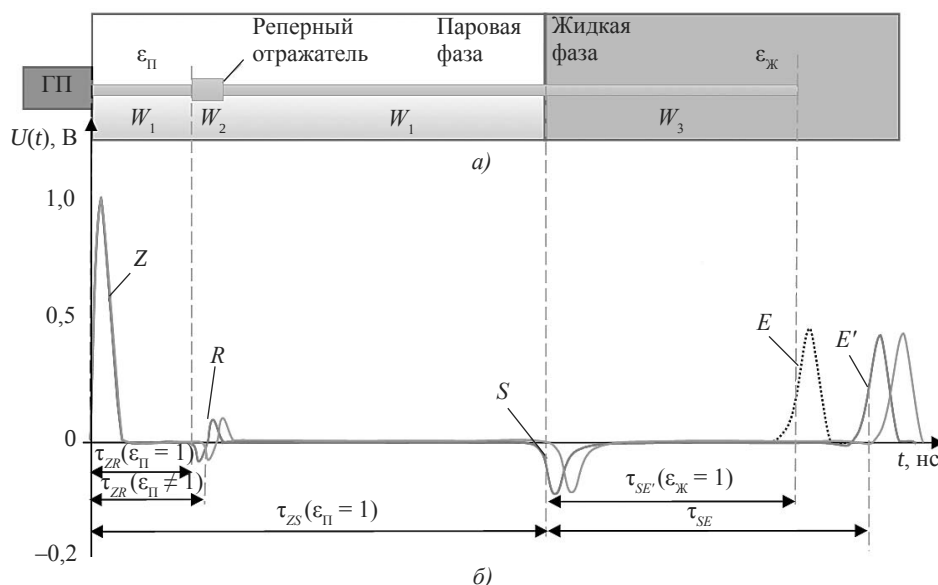


Рис. 2. Полиметрический датчик и соответствующие различным измерительным ситуациям полиметрические сигналы: *Z* — зондирующие импульсы; *R* — импульсы, отраженные от специального реперного отражателя; *S* — импульсы, отраженные от границы раздела фаз (пар–жидкость); *E*, *E'* — импульсы, отраженные от конца волновода; — — сигнал при отсутствии паровой фазы ($\epsilon_{\text{п}} = 1$); — — сигнал при наличии плотной паровой фазы ($\epsilon_{\text{п}} \neq 1$)

генератор-приемник импульсов ГП, нагруженный на волновод с установленным реперным отражателем, частично погружен в контролируемую жидкость. Волновод погружен в двухфазную среду — СПГ, паровая фаза имеет диэлектрическую проницаемость $\epsilon_{\text{п}}$, жидкая — $\epsilon_{\text{ж}}$. На рис. 2, б показаны примеры сигналов $U(t)$, полученные для случая отсутствия плотной паровой фазы над жидкостью и при ее наличии.

В процессе распространения излученного генератором импульса вдоль линии возникают отраженные от неоднородностей волнового сопротивления импульсы. По положению этих импульсов и их форме, временным задержкам между импульсами можно определить различные характеристики среды, через которую распространяется излученная электромагнитная волна. Измеряя временную задержку между зондирующим и отраженным от жидкой фазы продукта импульсом τ_{ZS} , можно определить расстояние от ГП до жидкой фазы в резервуаре L (и, следовательно, уровень жидкой фазы в резервуаре):

$$L = \frac{c\tau_{\text{ZS}}}{2\sqrt{\epsilon_{\text{п}}}},$$

где c — скорость электромагнитной волны в вакууме.

Диэлектрическая проницаемость паровой фазы $\epsilon_{\text{п}}$ достаточно сильно зависит от температуры, давления и состава газа (рис. 3). Для чистого пропана в указанных условиях диэлектрическая проницаемость может составлять от 1,00018 до 1,03966, что вызовет дополнительную погрешность определения расстояния до $0,02L$. Поэтому зачастую применяют различные схемы температурной коррекции [2, 6].

Для устранения погрешности измерения уровня, возникающей вследствие изменения диэлектрической постоянной, используется реперный отражатель, установленный на известном расстоянии от ГП — L_{PO} . В этом случае появляется возможность вычислять уровень жидкой фазы по формуле:

$$L = \tau_{\text{ZS}} \frac{L_{\text{PO}}}{\tau_{\text{PO}}},$$

Поскольку СПГ в емкости находится в двухфазном состоянии при различных давлениях и температурах, свойства паровой и жидкой фаз СПГ могут значительно изменяться. Так, при использовании поплавковых датчиков уровня может возникать дополнительная погрешность из-за изменения плотности

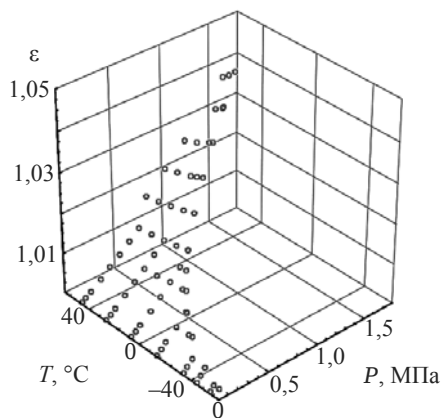


Рис. 3. Диаграмма разброса значений диэлектрической проницаемости пропана (паровая фаза) в зависимости от температуры и давления в емкости (данные [10])

жидкой фазы СПГ. На рис. 4 приведены графики зависимости плотности газообразной и жидкой фаз пропана и бутана от температуры.

Выражения для оценки значения плотности сжиженных газов по температуре, полученные путем регрессионного анализа экспериментальных данных (для равновесного состояния), представлены ниже:

$$\begin{aligned} \rho_{1ж}(T) &= 529,692 - 1,3539 \cdot T - 0,00343 \cdot T^2 - \\ &- 0,17 \cdot 10^{-4} \cdot T^3, \quad u(\rho_{1ж}) = \pm 0,12 \text{ кг/м}^3; \\ \rho_{2ж}(T) &= 601,044 - 1,068 \cdot T - 0,00167 \cdot T^2 - \\ &- 0,69 \cdot 10^{-5} \cdot T^3, \quad u(\rho_{2ж}) = \pm 0,2 \text{ кг/м}^3; \\ \rho_{1п}(T) &= 10,6899 + 0,293386 \cdot T + 2,873 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 + \\ &+ 0,985 \cdot 10^{-5} \cdot T^3, \quad u(\rho_{1п}) = \pm 0,03 \text{ кг/м}^3; \\ \rho_{2п}(T) &= 2,68372 + 0,092395 \cdot T + 0,001174 \cdot T^2 + \\ &+ 0,558 \cdot 10^{-5} \cdot T^3, \quad u(\rho_{2п}) = \pm 0,03 \text{ кг/м}^3; \\ T, ^\circ\text{C} &\in [-50; 50]. \end{aligned}$$

где $\rho_{1ж}$, $\rho_{1п}$ — плотности жидкой и паровой фаз пропана; $\rho_{2ж}$, $\rho_{2п}$ — плотности жидкой и паровой фаз нормального бутана; $u(\rho)$ — неопределенность оценки.

Плотность смеси пропана и бутана $\rho_{смж}$ может быть найдена согласно выражению:

$$\rho_{смж}(T_ж) = \rho_{1ж}(T_ж)x_1 + \rho_{2ж}(T_ж)x_2,$$

где $T_ж$ — текущая температура жидкости; $\rho_{1ж}$, $\rho_{2ж}$ — плотность жидкого пропана и бутана соответственно, x_1 , x_2 — молярные доли компонентов смеси.

В то же время плотность паровой фазы смеси также принято выражать через плотности составляющих смесь компонентов и их молярные доли:

$$\rho_{смп}(T_п) = \rho_{1п}(T_п)r_1 + \rho_{2п}(T_п)r_2,$$

где $T_п$ — текущая температура паровой фазы; $\rho_{1п}$, $\rho_{2п}$ — плотности паровой фазы пропана и бутана соответственно, r_1 , r_2 — молярные доли компонентов смеси в паровой фазе.

Если смесь углеводородов находится в замкнутом объеме (баллоне, цистерне) и при термодинамическом равновесии является двухфазной системой, то при данной температуре при известном составе жидкой фазы можно рассчитать состав паровой фазы или по составу паровой фазы определить состав жидкой, а также давление смеси. При термодинамическом равновесии двухфазной системы для каждого компонента парциальное давление газа, находящегося над уровнем жидкости (в паровой фазе), равно давлению паров компонента в жидкой фазе. Если парциальное давление компонента в паровой фазе превысит давление паров этого компонента в жидкой фазе, то наступит процесс конденсации. Противоположное соотношение давлений приводит к процессу испарения. Эти процессы будут протекать до тех пор, пока в системе не установится равновесие.

Данные о составе жидкой фазы (молярной доле пропана и бутана) могут быть косвенно получены по значению диэлектрической проницаемости жидкой фазы. Для вычисления значения диэлектрической проницаемости жидкости используется информация о текущем уровне жидкости в емкости. На рис. 2 показаны импульсы, отраженные от конца волноводной части: E — импульс, отраженный от конца чувствительного элемента, погруженного в жидкую фазу СПГ, E' — импульс, отраженный от конца волноводной части датчика в предположении, что $\epsilon_{ж} = 1$ (положение импульса может быть определено по значению уровня). Измеряя временные задержки между отраженным от продукта импульсом и импульсами, отраженными от конца датчика, можно оценить диэлектрическую проницаемость жидкой фазы τ_{SE} , $\tau_{SE'}$:

$$\epsilon_{ж} = \left(\frac{\tau_{SE}}{\tau_{SE'}} \right)^2.$$

Концентрация пропана может быть найдена по данным о диэлектрической проницаемости и температуре смеси (рис. 5).

Неопределенность оценки диэлектрической проницаемости жидкой фазы по сигналу (рис. 3) при толщине слоя жидкой фазы не менее 1 м и неопределенности оценки уровня $u_L = \pm 1$ мм не превышает $\pm 0,003$. При заданной неопределенности оценки температуры $u_T = \pm 1$ ° максимальная неопределенность оценки содержания пропана в смеси $u_{x1} = \pm 0,062$.

Регрессионный анализ данных о показателях газа в состоянии термодинамического равновесия позволил получить выражения для оценки давления насыщенных паров пропана и бутана в зависимости от температуры:

$$\begin{aligned} P_1(T) &= 0,466133 + 0,014531 \cdot T - 0,176 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 - \\ &- 0,889 \cdot 10^{-6} \cdot T^3, \quad u(P_1) = \pm 0,0015 \text{ МПа}; \\ P_2(T) &= 0,101966 + 0,003882 \cdot T - 0,595 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - \\ &- 0,386 \cdot 10^{-6} \cdot T^3, \quad u(P_2) = \pm 0,0012 \text{ МПа}; \\ T, ^\circ\text{C} &\in [-50; 50]. \end{aligned}$$

Упругость паров жидкой смеси равна сумме парциальных давлений компонентов смеси, поэтому:

$$P_{см} = P_1(T)x_1 + P_2(T)x_2 = P_1(T)x_1 + P_2(T)(1 - x_1).$$

Подставляя неопределенности оценки содержания пропана в пропан-бутановой смеси, неопределенность измерения температуры и варьируя температуру и концентрацию компонентов в указанных пределах, получим оценку неопределенности вычисления упругости паров: $u_p = \pm 0,103$ МПа.

Таким образом, для указанных ограничений были найдены оценки неопределенностей всех величин

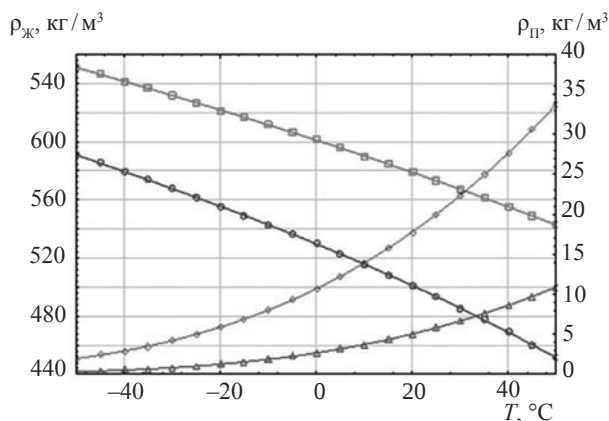


Рис. 4. Графики зависимостей плотности паровой и жидкой фаз пропана и бутана от температуры:

— плотность жидкой фазы пропана (левая ось); — плотность жидкой фазы бутана (левая ось); — плотность паровой фазы пропана (правая ось); — плотность паровой фазы бутана (правая ось)

(без использования информации от сторонних датчиков — только полиметрический ИВК), характеризующих состояние системы s . Оценим информационный эффект от работы ИВК в этом случае. Число вероятных состояний системы определяется по формуле:

$$N_{S4} = \left[\frac{2 \cdot u_T}{\delta T} + 1 \right] \left[\frac{2 \cdot u_L}{\delta L} + 1 \right] \left[\frac{2 \cdot u_P}{\delta P} + 1 \right] \left[\frac{2 \cdot u_{x1}}{\delta x_1} + 1 \right].$$

Для указанных ограничений $N_{S4} = 2574$, $H(N_{S4}) = 11,33$.

$$I = H(N_{S1}) - H(N_{S4}) = 19,073.$$

Удельное количество информации на один измерительный канал в случае применения традиционного ИВК (каналы измерения температуры, уровня, концентрации, давления):

$$I_{\text{утивк}} = \frac{H(N_{S1}) - H(N_{S3})}{N_{\text{тивк}}} = \frac{24,063}{4} \approx 6,016,$$

где $N_{\text{тивк}}$ — количество измерительных каналов, используемых в традиционном ИВК.

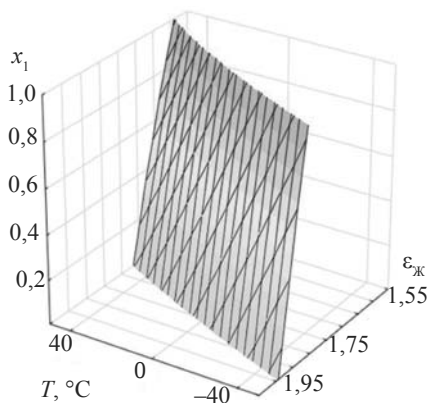


Рис. 5. График зависимости содержания пропана (молярная доля) в пропан-бутановой смеси от температуры смеси и значения диэлектрической проницаемости смеси

Удельное количество информации на один измерительный канал в случае применения полиметрического ИВК (температуры и уровня или уровня и давления):

$$I_{\text{упивк}} = \frac{H(N_{S1}) - H(N_{S4})}{N_{\text{пивк}}} = \frac{19,074}{2} = 9,33,$$

где $N_{\text{пивк}}$ — количество измерительных каналов, используемых в полиметрическом ИВК.

Видно, что удельное количество информации, которую получают с помощью представленного полиметрического ИВК, превосходит аналогичный показатель для традиционного ИВК в $9,33/6,016 \approx 1,55$ раз, что говорит о более высокой эффективности полиметрического ИВК. В то же время необходимо отметить, что системы неэквивалентны в плане точностных показателей. Существует возможность повысить точность за счет дополнительной информации, содержащейся в полиметрическом сигнале, например, определения диэлектрической проницаемости паровой фазы СПГ (составы паровой и жидкой фаз в состоянии термодинамического равновесия связаны между собой). Кроме того, при получении точной информации о составе газа значительно снижается неопределенность параметров рассматриваемой системы.

ВЫВОДЫ. 1. В качестве основного критерия для сравнения эффективности ИВК принято количество измерительной информации, получаемое в результате полного цикла измерений (рассчитывается исходя из определения энтропии по Шеннону).

2. На примере ИВК для контроля параметров сжиженного газа показано, что информационная эффективность полиметрического ИВК выше аналогичного показателя ИВК, построенных по традиционной архитектуре, в 1,55 раза.

3. Разработана методика контроля параметров сжиженного газа, которая позволяет по полиметрическому сигналу оценить основные параметры хранения СПГ без привлечения информации от дополнительных измерительных каналов.

4. Необходима разработка комплексной модели неопределенности оценки параметров СПГ с помощью полиметрического ИВК, которая должна включать взаимные связи компонентов модели для дальнейшей оптимизации методик и алгоритмов расчета показателей СПГ.

5. Перспективным направлением исследования является разработка методик коррекции показаний прибора по данным о диэлектрической проницаемости паровой фазы, составе жидкой/паровой фаз и проверка адекватности моделей в отсутствии термодинамического равновесия.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Жуков, Ю. Д.** Полиметрические системы: теория и практика : монография [Текст] / Ю. Д. Жуков, Б. Н. Гордеев, А. В. Зивенко, А. Ю. Грешнов, О. А. Зимина, В. Н. Чегринцев, Е. О. Пришепов ; под ред. Ю. Д. Жукова. — Николаев : Атолл, 2012. — 382 с.
- [2] **Жуков, Ю. Д.** Некоторые алгоритмические методы повышения точности полиметрических измерений [Текст] / Ю. Д. Жуков, А. В. Зивенко, А. Л. Виноградов // Вестник РГРТУ. — Рязань, 2013. — № 1 (выпуск 43). — С. 113–116.
- [3] **Кузьмин, И. В.** Основы теории информации и кодирования [Текст] / И. В. Кузьмин, В. А. Кедрус. — К. : Вища школа, 1986. — 238 с.
- [4] **Преображенский, Н. И.** Сжиженные углеводородные газы [Текст] / Н. И. Преображенский. — Л. : Недра, 1975. — 279 с.
- [5] **Рачков, М. Ю.** Физические основы измерений : учебное пособие [Текст] / М. Ю. Рачков, М. П. Гришин. — М. : МГИУ, 2007. — 160 с.
- [6] **Совлуков, А. С.** Измерение общей массы сжиженного углеводородного газа в резервуаре с применением радиочастотного датчика [Текст] / А. С. Совлуков // Материалы XII всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2014 (Москва, 16–19 июня 2014 г.). — М., 2014. — С. 7067–7075.
- [7] **Шеннон, К.** Работы по теории информации и кибернетике [Текст] / К. Шеннон. — М. : Издательство иностранной литературы, 1963. — 830 с.
- [8] **Keszthelyi, A.** How to Measure an Information System's Efficiency? [Text] / András Keszthelyi // MEB 2009 : 7-th International Conference on Management, Enterprise and Benchmarking (Budapest, Hungary, June 5–6, 2009). — Budapest, 2009. — P. 213–219.
- [9] **Tifenn R.** Energy efficiency in wireless sensor networks: A top-down survey [Text] / Tifenn Rault, Abdelmadjid Bouabdallah, Yacine Challal // Computer Networks. — Volume 67. — 4 July 2014. — P. 104–122.
- [10] **Younglove, B. A.** Thermophysical properties of Fluids. II. Methane, Ethane, Propane, Isobutane and Normal Butane [Text] / B. A. Younglove, J. F. Ely // The Journal of Physical and Chemical Reference Data (*JPCRD*). — Vol. 16. — № 4. — 1987. — P. 577–796.

© О. В. Зивенко

Надійшла до редколегії 19.05.2015.
Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. Б. М. Гордєєв