



**Yuriy D. Zhukov,**  
Жуков Юрий  
Данилович

УДК 681.128.8

## **CORRECTION TECHNIQUE FOR GUIDED WAVE RADAR LPG LEVEL MEASUREMENT SENSORS**

**МЕТОДИКА КОРРЕКЦІЇ ПОКАЗАНИЙ ВОЛНОВОДНИХ УРОВНЕМЕРОВ  
ДЛЯ СЖИЖЕННОГО УГЛЕВОДОРОДНОГО ГАЗА**

DOI [https://doi.org/10.15589/smi2019.2\(12\).3](https://doi.org/10.15589/smi2019.2(12).3)

**Yuriy D. Zhukov**

Yuriy D. Zhukov,  
Жуков Юрий Данилович, докт. техн. наук, проф.  
Yuriy.zhukov@nuos.edu.ua  
ORCID: 0000-0002-7454-8007

**Oleksii V. Zivenko**

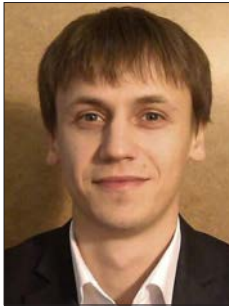
Oleksii V. Zivenko,  
Зивенко Алексей Васильевич, канд. техн. наук, доцент  
oleksii.zivenko@nuos.edu.ua  
ORCID 0000-0002-1539-8360

**Yevgen A. Gudyma**

Yevgen A. Gudyma,  
Гудыма Евгений Анатольевич, аспирант  
ievgen@gudyma.com  
ORCID 0000-0003-0169-1205

**Anna N. Raieva**

Anna N. Raieva,  
Раева Анна Николаевна, магистрант  
raevaany@gmail.com  
ORCID 0000-0003-2357-9601



**Oleksii V. Zivenko,**  
Зивенко Алексей  
Васильевич

*National University of Shipbuilding, Mykolayiv*

*Національний університет кораблебудування, м. Миколаїв*



**Yevgen A. Gudyma,**  
Гудыма Евгений  
Анатольевич

**Abstract.** Relevant issue of the development of measurement procedures for LPG reviewed. It is shown that use of guided wave radar level sensors is affected by additional error. This error is related with the properties of the LPG vapor phase as propagation medium for electromagnetic wave. The main purpose of this research is to study mentioned additional error and develop correction technique which will reduce this inaccuracy without modification of existing GWR sensors. The additional error is illustrated with the help of the model of the propane-butane mixture stored in the reservoir under pressure with various temperatures. The dielectric constant of LPG components mixture is modeled using generalized reference data and known relations between density and dielectric permittivity of the gases. Simulation results are compared with the results of practical measurements. Numerical estimates of the additional level measurement error and appropriate LPG volume calculation error are obtained. It is indicated that with the increase of the vapor pressure and temperature, an increase in the density of the vapor phase of the LPG is observed. This leads to the underestimation of the level in the storage tank and can be corrected with the help of the data about the current value of dielectric constant of the vapor phase.

The correction technique which includes calculation of the correction coefficient based on a known position of the control marks is described. Another approach to calculate the correction coefficient, based on the data about composition (or density) of the LPG vapor phase is given. Data about the composition of the vapor phase can be obtained by calculating the composition of the liquid phase, followed by calculation of the vapor phase composition for the thermodynamic equilibrium. Scientific novelty is a correction technique for GWR level sensor based on information about the density or composition of the LPG vapor phase. The practical value of this study lies in the implementation of developed algorithms and deploying obtained models to reduce mentioned additional error without modifications of the level sensor design and to use.

**Key words:** polymetric system, level sensor, LPG, propane-butane mixture, uncertainty, vapor phase, dynamic vapor compensation.



**Anna N. Raieva,**  
Раева Анна  
Николаевна

**Анотація.** Розглянуто актуальну задачу розробки методик виконання вимірювань скраплених вуглеводневих газів. Показано, що під час застосування хвилеводних радарних рівнемірів для вимірювання рівня рідкої фази СВГ може виникати додаткова похибка, зумовлена зміною властивостей парової фази СВГ як середовища поширення електромагнітних хвиль. Мета статті полягає у вивченні характеру додаткової похибки вимірювання та в розробці методики корекції, що дозволить знизити або усунути похибку, максимально уникаючи конструктивних доробок наявних рівнемірів. Вказаний ефект проілюстровано на прикладі пропан-бутанової суміші, що зберігається у резервуарі під

тиском, за різних температур. На базі узагальнення довідкових даних, використання відомих співвідношень отримана залежність діелектричних властивостей компонентів СВГ від значення густини парів. Результати моделювання зрівнюються з результатами практичних вимірювань. Отримано числові оцінки додаткової похибки вимірювання рівня та відповідних похибок оцінки об'єму СВГ. Вказано, що із ростом тиску та температури пару спостерігається підвищення густини парової фази СВГ, що в результаті веде до недооцінки рівня в резервуарі зберігання. Цей недолік може бути усунено шляхом використання даних про діелектричні властивості парової фази. Разом з описом методики корегування результатів вимірювання, що базується на розрахунку коефіцієнта коригування за відомою відстанню до контрольних точок, надана методика коригування, що заснована на розрахунку коефіцієнта за даними про склад (або густину) парової фази СВГ. Дані про склад парової фази можуть бути отримані за допомогою перерахунку складу рідкої фази із наступним розрахунком складу парової фази для стану термодинамічної рівноваги.

Наукова новизна полягає у способі коригування показників хвилеводних рівнемірів, а саме – методиці коригування на базі інформації про густину СВГ. Практична цінність дослідження полягає в отриманні алгоритмічного апарату для мінімізації додаткової похибки вимірювання без застосування конструктивних доробок рівнеміру або поліметричної системи.

**Ключові слова:** поліметрична система, датчик рівня, скраплений вуглеводневий газ, пропан-бутанова суміш, динамічна компенсація впливу парової фази.

## References

- [1] Ukraina povyshaet zakupki avtogaza. Argus Shzhizhennyj gaz i kondensat. [Ukraine boosts auto gas purchases. ARGUS LPG & condensate] (2019, November 14). Retrieved November 15, 2019, Retrieved from: <https://www.argusmedia.com/ru/news/2015153-ukraina-povyshaet-zakupki-avtogaza>.
- [2] BP Statistical Review of World Energy, 68 Edition. (2019, June). Retrieved November 15, 2019, from <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf>.
- [3] Statistical Review of Global LPG 2019. (2019, October 7). Retrieved October 10, 2019, Retrieved from: <https://www.wlpga.org/publication/statistical-review-global-lpg-2018-2/>.
- [4] World LPG Association Annual Report 2018. (2019, January 19) Retrieved October 10, 2019, Retrieved from: [https://www.wlpga.org/wp-content/uploads/2019/01/WLPGA-ANNUAL-REPORT-2018\\_FINALdt-amendment-p42.pdf](https://www.wlpga.org/wp-content/uploads/2019/01/WLPGA-ANNUAL-REPORT-2018_FINALdt-amendment-p42.pdf).
- [5] Raslavičius, L. et. al. (2014). Liquefied petroleum gas (LPG) as a medium-term option in the transition to sustainable fuels and transport. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 513–525. doi: 10.1016/j.rser.2014.01.052.
- [6] Yaremenko, T.V. (2017). Avtomatizaciya obliku skraplenogo vuglevodnogo gazu. [Automation of liquefied hydrocarbon gas (LPG) accounting] *Informacijni Sistemi, Mehanika ta keruvannya*, 16, 127–134. doi: 10.20535/2219-3804162017100750.
- [7] Zivenko, O.V. (2019). Osoblivosti obliku skraplenogo vuglevodnogo gazu pid chas zberigannya ta transportuvannya. [LPG accounting specificity during its storage and transportation]. *Vimiryvalna Tehnika Ta Metrologiya*, 80(3), 21–27. doi: 10.23939/istctm2019.03.021.
- [8] Zivenko, O., & Gudyma, I. (2017). Accuracy Improvement of an LPG Inventory System. In «EKO Varna. TRANSPORT, EKOLOGIYA -USTOJCHIVO RAZVITIE», (pp. 52–56). Varna, Bulgaria : Varna Technical University.
- [9] Zorya, E.I., Yakovlev, A.L., Larionov, S.V. (2012). *Opredelenie massy szhizhennyh uglevodorodnyh gazov pri prieme, hranenii i otpuske potrebitelyam. Uchebnoe posobie*. [LPG Mass calculation during its receipt, storage and sales. Manual] Moskva: Izdatelskij dom “Nedra”.
- [10] Artihovich, V.V., Pshonik, M.G. (2010). *Szhizhennye uglevodorodnye gazy: uchebno-metodicheskoe posobie*. [LPG: Study Guide] Minsk: BNTU.
- [11] Chegrinec, V.N. (2013). Korrekciya funkcii preobrazovaniya pri izmerenii urovnya s pomoshyu polimetricheskoj informacionnoj sistemy. [Correction of the transformation function of a level measurement by means of the polymeric information system] *Vimiryvalna ta obchislyvalna tehnika v tehnologichnih procesah*, 2, 33–38.
- [12] Zhukov, Yu.D. i dr. (2012). *Polimetricheskie sistemy: teoriya i praktika: Monografiya*. [Polymetric systems: theory and practice: Monograph] Nikolaev, Ukraine: Atoll.
- [13] Emerson Rosemount. Technical Note: Using Guided Wave Radar for Level in High Pressure Steam Applications. Retrieved November 10, 2019, from <https://www.emerson.com/documents/automation/technical-note-using-guided-wave-radar-for-level-in-high-pressure-steam-applications-rosemount-en-76264.pdf>.
- [14] Zivenko, A. V., Nakonechniy, A. G., & Motorkin, D. Y. (2013). Level measurement principles & sensors. In *Materialy IX mezinardni vedecko-practicka conference “Veda a technologie: krok do budoucnosti – 2013”* (Vol. 28, pp. 85–90). Prague : Technicke vedy.
- [15] NDC “Institut metrologiyi”. Vidtvorennya ta zberigannya rozmiru odinici dovzhini dlya rivnya ridini. DETU 03-02-97. [Reproduction and maintenance of the size of length unit for liquid level]. Retrieved from: <http://www.metrology.kharkov.ua/index.php?id=347&L=0>.

- [16] DSTU 3497-97 “Metrologiya. Derzhavna povirochna shema dlya zasobiv vimiryuvan rivnya ridini” [Metrology. State verification scheme for liquid level measuring instruments] (1997). Kyiv, State standart of Ukraine, p 8 .
- [17] API Manual of Petroleum Measurement Standards. Chapter 11. Physical Properties Data Section 2, Part 4 – Temperature Correction for the Volume of NGL and LPG Tables 23E, 24E, 53E, 54E, 59E, and 60E. ASTM Technical Publication.
- [18] GSTU 320.00149943.016-2000 “Gazi vuglevodnevi skrapleni. Metodika rozrahunku vtrat” [LPG. Methodology of calculation of losses] (2000). Kiyv, Derzhnaftogazprom, p.17.
- [19] Quantityware. LPG Measurement Standard Selection. Influence on Business Processes, Working Paper: How does the selection of my LPG measurement standard influence my business processes? (2017). p. 13.
- [20] GOST 28656-90 “Gazi vuglevodnevi zridzheni. Rozrahunkovij metod viznachennya shilnosti i tisku nasichenih pariv. Zi zminoyu № 1.” [LPG. The calculation method for saturated steam pressure and density. With a change № 1] (1999). 14 p.
- [21] Tereshin, V.I., Sovlukov A.S. (2016). Povyshenie tochnosti izmerenij massy nefteproduktov pri primenenii radiochastotnyh datchikov. V sb. IV Mezhdunarodnoj metrologicheskoy konferencii “Aktualnye voprosy metrologicheskogo obespecheniya izmerenij rashoda i kolichestva zhidkostej i gazov”, [Improving the accuracy of measurements of the mass of oil products using radio frequency sensors] Kazan, Rossiya. 70–75 pp.
- [22] Schmidt, J.W., & Lemmon, E.W. (2003). Dielectric Permittivity of Eight Gases Measured with Cross Capacitors. *International Journal of Thermophysics*, 24(2), 375–403.
- [23] Younglove, B. A., & Ely, J. F. (1987). Thermophysical properties of fluids. II. Methane, Ethane, Propane, Isobutane and Normal Butane. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 16(4), 577–798.
- [24] Maya, E.F., Edwardsa, T.J., Manna, A.G., & Manning, D. K. (2004). Density, dielectric constant and PVT measurements of a gas condensate fluid. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 41, 297–308.

**Постановка проблемы и анализ исследований и публикаций.** В течение последних лет в Украине и мире продолжается рост потребления сжиженного углеводородного газа (СУГ) [1–3]. Рост потребления связан с относительно невысокой ценой СУГ для применения в быту и промышленности, высокой экономической эффективностью применения СУГ в качестве топлива, хорошими показателями его экологичности [4; 5]. Вместе с тем специфика СУГ определяет требования к его учету, а именно к методикам выполнения измерений и применяемым средствам измерительной техники [6–8]. СУГ представляет собой смесь пропана и бутана, в которой в небольшом количестве присутствуют метан, этан и другие компоненты [9; 10]. Свойства СУГ в значительной степени зависят от температуры и давления, что должно быть учтено в процессе измерений, описано в соответствующих методиках выполнения измерений. Так, для уровнемеров, принцип действия которых связан с косвенным определением пройденного импульсами расстояния и последующим определением уровня, требуется выполнять дополнительную коррекцию функции преобразования прибора [11–13]. Это происходит вследствие изменения скорости распространения волн при изменении свойств среды распространения. Анализ и изучение дополнительной погрешности, изучение влияния паровой фазы на показания уровнемеров и последующий расчет массы СУГ в емкости, а также выработка корректирующих мер с целью повышения точности определения параметров СУГ, совершенствования методик коммерческого учета в целом являются актуальной задачей.

**Целью работы** является анализ дополнительной погрешности измерения уровня, связанной с изменением диэлектрической проницаемости паровой фазы

СУГ, выработка соответствующих корректирующих мер, что позволит без внесения конструктивных изменений в чувствительный элемент устранить или существенно снизить указанную дополнительную погрешность.

**Изложение основного материала.** Для коммерческого учета сжиженных под давлением газов в резервуарах хранения необходимо точно измерять уровень раздела газообразной и жидкой фаз, а также уровень подтоварной воды (в случае ее присутствия). Широко внедрены волноводные уровнемеры (*GWR* – волноводный радарный уровнемер, также часто называемый *TDR* – рефлектометрический радар с временным разрешением или *MIR* – микроимпульсным радаром), принцип действия которых основан на излучении коротких электромагнитных импульсов в специальный волновод и последующем измерении временного интервала между излученными и отраженными от границ разделов сред импульсами [12–14]. Такие уровнемеры имеют целый ряд эксплуатационных преимуществ: возможность одновременного контроля уровня и уровня раздела сред, высокая надежность из-за отсутствия подвижных частей, практически нулевые затраты на техническое обслуживание, сравнительно высокая точность измерений [14]. В то же время, распространение такие получили полиметрические системы [12], как развитие метода импульсной рефлектометрии. Особенностью таких систем является формирование и обработка высокоинформативного сигнала, который несет информацию о значении нескольких показателей контролируемого продукта или процесса. Одним из примеров таких сигналов можно считать рефлектограмму – сигнал волноводного уровнемера. На рис. 1 а) показан датчик специальной конструкции 1, установленный в резервуар 2 высотой *H*

и частично погруженный в среду 3, уровень  $h$  которой подлежит контролю. Процесс формирования импульсного сигнала (рис. 1, б) включает: излучение коротких электромагнитных импульсов, контактное зондирование этими импульсами исследуемой среды; прием и обработку совокупности излученных и отраженных импульсов с целью интерпретации сигнала – оценки уровня и других характеристик жидкости / процесса. В таком случае форма и взаимное расположение отраженных от границ раздела сред импульсов (информативные параметры сигнала) зависят от расстояния до границы раздела сред или других неоднородностей волнового сопротивления, от свойств сред распространения импульсов.

Для оценки расстояния до границы раздела сред (уровня СУГ в резервуаре) в этом случае применяется модель:

$$L_0 = \frac{t_0 c}{2\sqrt{\epsilon_0}}, \quad (1)$$

где  $c$  – скорость распространения электромагнитной волны в вакууме (скорость света),  $\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость среды 0-го слоя.

Характеристика преобразования вида (1), хранящаяся в электронном блоке уровнемера / полиметрической системы, в явном или неявном виде, содержит данные об относительной диэлектрической проницаемости среды, сквозь которую распространяются излученные электромагнитные импульсы. Как правило, данные о характеристике преобразования получают путем градуировки измерительных каналов на уровнеметрических установках [15] согласно [16] или специальных стендах с образцовыми средствами измерения уровня высокой точности. Такие характеристики преобразования получают в нормальных условиях и соответственно должны быть скорректированы на влияние избыточного дав-

ления и температуры. В [13] приведен алгоритм и соответствующие данные расчетов для коррекции показаний уровнемера при изменении давления и температуры водяного пара, что особенно важно при запуске и выходе на режим технологического оборудования. Жидкая и паровая фазы в этом случае изменяют значения своих плотностей, что может привести к погрешности оценки расстояния до 30% (для температур свыше 315 °С).

Аналогичную методику коррекции используют для СУГ. Для этого необходимо использовать специальный стационарно установленный отражатель на известном расстоянии от базовой плоскости либо использовать информацию об известном положении меток, подобно [11]. Однако не всегда является удобным использовать отражения от специальных неоднородностей из-за вносимых меток ими искаженного сигнала. Независимо от указанных фактов для оценки применимости коррекции необходимо проанализировать характер дополнительной погрешности на основе модели или экспериментальных данных, полученных для интересующих диапазонов применения: диапазон изменения давления (0..2.5 МПа) и температуры (-40..+40°С). Результаты коррекции для чистого пропана частично приведены в [8]. Известно также, что свойства других компонентов СУГ значительно отличаются от свойств пропана, что может оказать влияние на итоговый результат коррекции и применимость метода в целом.

Алгоритм коррекции в данном случае может выглядеть следующим образом. На первом этапе получают значения плотности жидкой фазы СУГ путем применения стационарного плотномера, отбора пробы либо используя паспортное значение последней принятой партии СУГ. На втором этапе вычисляют плотность паровой фазы СУГ. Вычисление плотности паровой фазы может произ-

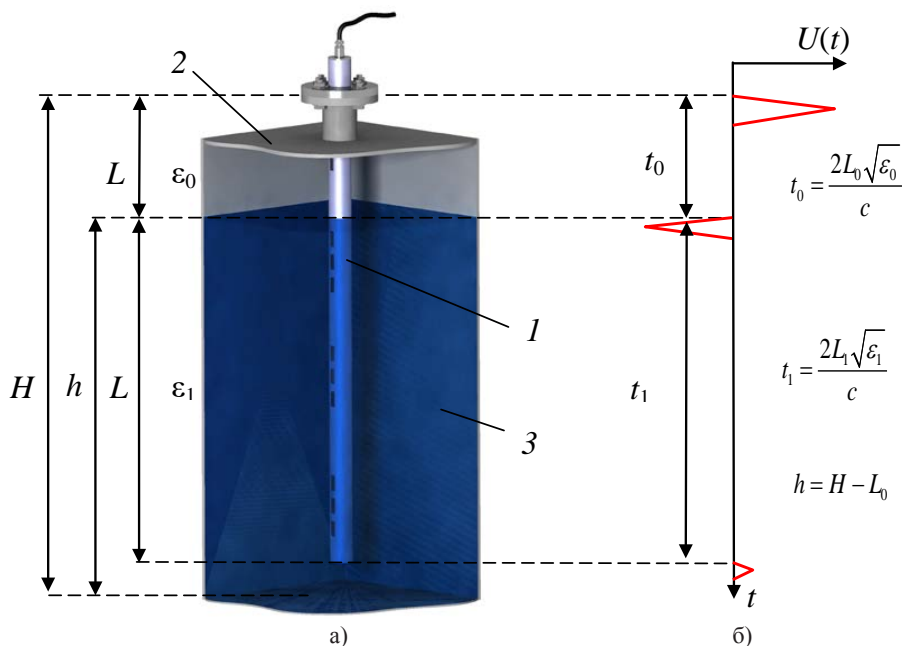


Рис. 1. Пояснение принципа действия рефлектметрических датчиков

ведено исходя из сведений о концентрациях компонентов паровой фазы СУГ, давления и температуры в емкости. Следующим этапом служит вычисление диэлектрической проницаемости паровой фазы исходя из данных о ее плотности и определение коэффициента коррекции. В случае если состав СУГ неизвестен, для практической оценки можно предположить, что в паровой фазе находятся только пропан и бутан.

Плотность жидкой фазы СУГ  $\rho_{ж}(T_{тек.})$  может быть получена применением стационарных плотномеров, либо с помощью отбора пробы и применения переносных денсиметров для СУГ при текущей температуре  $T_{тек.}$  В случае использования паспортного значения плотности СУГ необходимо привести значение плотности к текущим условиям измерений. Приведение плотности продукта к стандартным или к текущим условиям производится с помощью соответствующих таблиц и методик [17; 18]. При этом различия в методиках приведения или в таблицах существенно отражаются на итоговом результате расчетов [19].

Расчет компонентного состава жидкой фазы СУГ в предположении, что смесь является двухкомпонентной выполняется на основании известных значений молярных масс пропана и бутана, температуры и известных зависимостей плотностей компонентов от температуры.

Плотность жидкой фазы можно выразить через концентрации компонентов смеси и соответствующие значения плотностей:

$$\rho_{жф}(T_{тек.}) = x_{пр}\rho_{жпр}(T_{тек.}) + x_{б}\rho_{жб}(T_{тек.}), \quad (2)$$

где  $\rho_{жф}$  – значение плотности жидкой смеси бутана и пропана при температуре  $T_{тек.}$ ,  $x_{пр}$ ,  $x_{б}$  – значения молярных долей пропана и бутана в жидкости соответственно;  $\rho_{жпр}$ ,  $\rho_{жб}$  – значения плотности жидкого пропана и бутана при температуре  $T_{тек.}$

Для расчета состава паровой фазы в случае равновесного состояния можно использовать законы Дальтона и Рауля. Для каждого компонента смеси  $i$  справедливо:

$$r_i P_c = x_i P_i, \quad (3)$$

где  $r_i$  – молярная доля  $i$ -го компонента паровой фазы,  $x_i$  – молярная доля  $i$ -го компонента жидкой фазы смеси,  $P_c$  – упругость паров смеси (давление в емкости),  $P_i$  – упругость паров  $i$ -го компонента смеси.

Парциальное давление каждого компонента смеси определяется по справочным данным [20]. Давление смеси может определяться измерением (в состав измерительной системы присутствует датчик давления) либо расчетным путем согласно данным о составе СУГ.

Определение состава паровой фазы в случае пропан-бутановой смеси выполняется с использованием выражения (3):

$$r_{пр} = \frac{x_{пр} P_{пр}}{P_c}, \quad r_{б} = 1 - r_{пр}. \quad (4)$$

По составу паровой фазы находят среднюю плотность паровой фазы  $\rho_{п}$ . В случае смеси из пропана и бутана применяются таблицы VIII-A-3, VIII-A-4 [18]. В этом случае выражение для оценки плотности паровой фазы полностью совпадает с выражением (2) за исключением того, что плотность паровой фазы также является функцией давления в резервуаре.

В случае многокомпонентной смеси вычисляют приведенное давление и температуру паровой смеси, а также путем решения уравнения Редлиха-Квонга получают оценку коэффициента сжимаемости [9]. В этом случае плотность паровой фазы определяется как:

$$\rho_n = \frac{p \cdot 10^6}{Z \cdot R \cdot (273,15 + T_n)}, \quad (5)$$

где  $p$  – абсолютное давление, МПа;  $T_n$  – температура паровой фазы СУГ, °C;  $R$  – удельная газовая постоянная, Дж/(кг\*К);  $Z$  – коэффициент сжимаемости.

Значения плотности паровой фазы СУГ (как неполярного диэлектрика) можно связать со значением диэлектрической проницаемости паровой фазы на базе уравнения Клаузиуса-Мосотти [21]:

$$\rho = \frac{3\mu}{4\pi N_a \alpha} \frac{(\varepsilon - 1)}{(\varepsilon + 2)}, \quad (6)$$

где  $\rho$  – плотность вещества,  $\mu$  – молекулярная масса вещества,  $\alpha$  – поляризуемость вещества,  $N_a$  – число Авогадро.

В выражении (6) первый множитель – постоянная для каждого вещества величина [21].

Данные о значении диэлектрической проницаемости и плотности компонентов СУГ при различных значениях температур и давлений, представленные на рис. 2.

Данные рис. 2 представляют собой обобщение результатов, полученных разными авторами путем измерений или расчетов [8, с. 22–24] для пропана, бутана, изобутана, этана и других основных компонентов СУГ.

Сопоставление результатов расчетов диэлектрической проницаемости по плотности

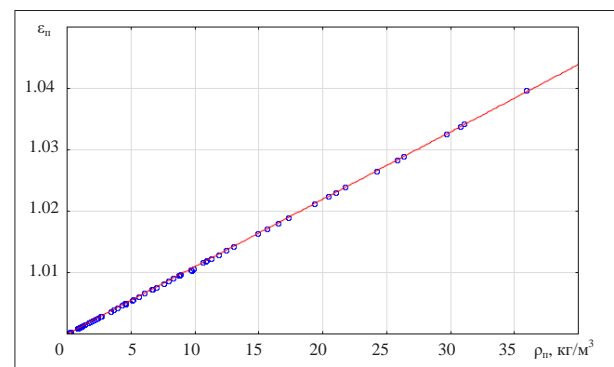


Рис. 2. Кривая зависимости диэлектрической проницаемости паровой фазы СУГ от значения ее плотности

паровой фазы дает приемлемую сходимость с полученными на практике данными. Так, для чистого пропана отклонение расчетного значения диэлектрической проницаемости от полученного путем измерения составляет не более  $\pm 0.0005$ .

Для демонстрации величины погрешности, вызванной отклонением диэлектрической проницаемости СУГ от диэлектрической проницаемости воздуха зададимся исходными данными. В горизонталь-

ном стальном резервуаре хранения находится чистый пропан, чистый бутан, пропан-бутановая смесь 50/50 (мас.). Базовая высота емкости составляет 3 316 мм, максимальная вместимость – 196.1 м<sup>3</sup>. Уровни заполнения по объему – 10, 50 и 85%, что соответствует уровню заполнения емкости от дна – 522.25, 1674.86 и 2652.07 мм соответственно; средняя температура СУГ в диапазоне -30..+30°C. Результаты расчета сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Результаты расчета дополнительной погрешности измерения уровня СУГ

Значение погрешности	Уровень заполнения резервуара $V_{max}=196.1 \text{ м}^3, \%$		
	10	50	85
	Пропан, $T_n = -30 \text{ }^\circ\text{C}, P = 0.165 \text{ МПа}$		
$\Delta H, \text{ мм}$	-5.673	-3.333	-1.348
$\Delta V_{\text{жф}}, \text{ л}$	-301	-249	-82
$\Delta V_{\text{жф}}, \%$	-1.534	-0.254	-0.049
Пропан, $T_n = 0 \text{ }^\circ\text{C}, P = 0.466 \text{ МПа}$			
$\Delta H, \text{ мм}$	-15.714	-9.231	-3.734
$\Delta V_{\text{жф}}, \text{ л}$	-829	-689	-226
$\Delta V_{\text{жф}}, \%$	-4.23	-0.7	-0.136
Пропан, $T_n = 30 \text{ }^\circ\text{C}, P = 1.085 \text{ МПа}$			
$\Delta H, \text{ мм}$	-37.205	-21.856	-8.842
$\Delta V_{\text{жф}}, \text{ л}$	-1945	-1632	-536
$\Delta V_{\text{жф}}, \%$	-9.92	-1.66	-0.32
Бутан, $T_n = -30 \text{ }^\circ\text{C}, P = 0.029 \text{ МПа}$			
$\Delta H, \text{ мм}$	-0.686	-0.403	-0.163
$\Delta V_{\text{жф}}, \text{ л}$	-36	-3	-0.99
$\Delta V_{\text{жф}}, \%$	-0.186	-0.031	0
Бутан, $T_n = 0 \text{ }^\circ\text{C}, P = 0.102 \text{ МПа}$			
$\Delta H, \text{ мм}$	-2.968	-1.743	-0.705
$\Delta V_{\text{жф}}, \text{ л}$	-158	-130	-43
$\Delta V_{\text{жф}}, \%$	-0.803	-0.133	-0.026
Бутан, $T_n = 30 \text{ }^\circ\text{C}, P = 0.282 \text{ МПа}$			
$\Delta H, \text{ мм}$	-8.157	-4.792	-1.939
$\Delta V_{\text{жф}}, \text{ л}$	-432	-358	-117
$\Delta V_{\text{жф}}, \%$	-2.2	-0.365	-0.07
Пропан-Бутан (50/50), $T_n = -30 \text{ }^\circ\text{C}, P = 0.106 \text{ МПа}$			
$\Delta H, \text{ мм}$	-4.04	-2.373	-0.96
$\Delta V_{\text{жф}}, \text{ л}$	-214	-177	-58
$\Delta V_{\text{жф}}, \%$	-1.093	-0.181	-0.035
Пропан-Бутан (50/50), $T_n = 0 \text{ }^\circ\text{C}, P = 0.309 \text{ МПа}$			
$\Delta H, \text{ мм}$	-11.336	-6.659	-2.694
$\Delta V_{\text{жф}}, \text{ л}$	-599	-497	-163
$\Delta V_{\text{жф}}, \%$	-3.057	-0.507	-0.098
Пропан-Бутан (50/50), $T_n = 30 \text{ }^\circ\text{C}, P = 0.739 \text{ МПа}$			
$\Delta H, \text{ мм}$	-26.923	-15.816	-6.398
$\Delta V_{\text{жф}}, \text{ л}$	-1414	-1181	-387
$\Delta V_{\text{жф}}, \%$	-7.212	-1.204	-0.232

В таблице 1 приведены результаты расчетов дополнительной погрешности расчета уровня  $\Delta H$ , вызванной изменением диэлектрической проницаемости паровой фазы СУГ. Также в таблице 1 приведена оценка величины погрешности оценки объема жидкой фазы СУГ  $\Delta V_{\text{жф}}$ , вызванная дополнительной погрешностью оценки уровня  $\Delta H$ . Видно, что с ростом давления в резервуаре растет значение средней плотности паровой фазы, а, следовательно, согласно рис. 2 – растет и значение диэлектрической проницаемости паровой фазы. Это приводит к недооценке фактического значения уровня в емкости и как следствие недооценке объема жидкой фазы СУГ. Из табл. 1 также видно, что при росте количества пропана в пропан-бутановой смеси дополнительная погрешность оценки уровня также растет, что связано с более высокой плотностью паров пропана по сравнению с бутаном.

**Обсуждение полученных результатов.** Сопоставление полученных результатов расчета рассматриваемой дополнительной погрешности измерения уровня с данными, полученными для «чистого» пропана [8], дают расхождения, которые не превышают  $\pm 5\%$  от значения наблюдаемой на практике погрешности оценки расстояния. Расхождения для полученной модели расчета значения диэлектрической проницаемости паровой фазы СУГ по значению ее плотности, не превышают  $\pm 0.0005$  по сравнению с данными измерений, полученными различными авторами [22–24]. Это подтверждает гипотезу о воз-

можной коррекции показаний рефлектометрических уровнемеров по данным о составе СУГ или данным о плотности его паровой фазы.

**ВЫВОДЫ.** Проведенный анализ дополнительной погрешности измерения уровня с помощью волноводных микроимпульсных уровнемеров, связанной с изменением диэлектрической проницаемости паровой фазы СУГ, доказывает необходимость коррекции их показаний (или полиметрических систем на их основе). Полученные численные значения погрешности в зависимости от состава пропан-бутановой смеси, условий ее хранения, позволяют построить эффективный алгоритм коррекции показаний уровнемеров без внесения дополнительных изменений в их конструкцию. Разработанная методика коррекции показаний может быть обобщена для любых углеводородов или других газов, пары которых существенно меняют свойства в зависимости от давления или температуры. Необходимым шагом дальнейшего развития является исследование разработанного алгоритма коррекции в отношении устойчивости к погрешностям входных данных. Перспективным направлением исследования является коррекция показаний совместно с данными об известном положении неоднородностей совместно с данными о плотности паровой фазы, соотношении получаемых коэффициентов коррекции и применения данной информации для выработки решающих правил и адаптации алгоритма коррекции.

### Список литературы

- [1] Украина повышает закупки автогаза. Argus Сжиженный газ и конденсат. (2019, November 14). Retrieved from <https://www.argusmedia.com/ru/news/2015153-украина-повышает-закупки-автогаза>. (November 15, 2019).
- [2] BP Statistical Review of World Energy, 68 Edition. (2019, June). Retrieved from: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf>. (November 15, 2019).
- [3] Statistical Review of Global LPG 2019. (2019, October 7). Retrieved October 10, 2019, from <https://www.wlpga.org/publication/statistical-review-global-lpg-2018-2/>.
- [4] World LPG Association Annual Report 2018. (2019, January 19) Retrieved October 10, 2019, from [https://www.wlpga.org/wp-content/uploads/2019/01/WLPGA-ANNUAL-REPORT-2018\\_FINALdt-amendment-p42.pdf](https://www.wlpga.org/wp-content/uploads/2019/01/WLPGA-ANNUAL-REPORT-2018_FINALdt-amendment-p42.pdf).
- [5] Raslavičius, L. et. al. (2014). Liquefied petroleum gas (LPG) as a medium-term option in the transition to sustainable fuels and transport. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 513–525. doi: 10.1016/j.rser.2014.01.052.
- [6] Яременко, Т. В. (2017). Автоматизация обліку скрпленого вуглеводневого газу. *Інформаційні Системи, Механіка Та Керування*, 16, 127–134. doi: 10.20535/2219-3804162017100750.
- [7] Зівенко, О. В. (2019). Особливості обліку скрапленого вуглеводневого газу під час зберігання та транспортування. *Вимірювальна Техніка Та Метрологія*, 80(3), 21–27. doi: 10.23939/istcmtm2019.03.021.
- [8] Zivenko, O., & Gudyma, I. (2017). Accuracy Improvement of an LPG Inventory System. In «EKO Varna. ТРАНСПОРТ, ЕКОЛОГІЯ – УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ», (pp. 52–56). Varna, Bulgaria: Varna Technical University.
- [9] Зоря, Е. И., Яковлев, А. Л., Ларионов, С. В. (2012). *Определение массы сжиженных углеводородных газов при приеме, хранении и отпуске потребителям. Учебное пособие*. Москва: Издательский дом "Недра".
- [10] Артихович, В. В., Пшоник, М. Г. (2010). *Сжиженные углеводородные газы: учебно-методическое пособие*. Минск: БНТУ.
- [11] Чегринец, В. Н. (2013). Коррекция функции преобразования при измерении уровня с помощью полиметрической информационной системы. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, 2, 33–38.
- [12] Жуков, Ю.Д. и др. (2012). *Полиметрические системы: теория и практика* : монография. Николаев, Украина: Атолл.

- [13] Emerson Rosemount. Technical Note: Using Guided Wave Radar for Level in High Pressure Steam Applications. Retrieved November 10, 2019, from <https://www.emerson.com/documents/automation/technical-note-using-guided-wave-radar-for-level-in-high-pressure-steam-applications-rosemount-en-76264.pdf>.
- [14] Zivenko, A. V., Nakonechniy, A. G., & Motorkin, D. Y. (2013). Level measurement principles & sensors. In *Materialy IX mezinarodni vedecko-practicka conference "Veda a technologie: krok do budoucnosti – 2013"* (Vol. 28, pp. 85–90). Prague : Technicke vedy.
- [15] НДЦ «Інститут метрології». Відтворення та зберігання розміру одиниці довжини для рівня рідини. ДЕТУ 03-02-97. Retrieved November 15, 2019, from <http://www.metrology.kharkov.ua/index.php?id=347&L=0>.
- [16] ДСТУ 3497-97 «Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювань рівня рідини» (1997). Київ, Держстандарт України, 8 с.
- [17] API Manual of Petroleum Measurement Standards. Chapter 11. Physical Properties Data Section 2, Part 4 – Temperature Correction for the Volume of NGL and LPG Tables 23E, 24E, 53E, 54E, 59E, and 60E. ASTM Technical Publication.
- [18] ГСТУ 320.00149943.016-2000 «Гази вуглеводневі скраплені. Методика розрахунку втрат» (2000). Київ, Держнафтогазпром, 17 с.
- [19] Quantityware. LPG Measurement Standard Selection. Influence on Business Processes, Working Paper: How does the selection of my LPG measurement standard influence my business processes? (2017). 13 p.
- [20] ГОСТ 28656-90 «Гази вуглеводневі зріджені. Розрахунковий метод визначення щільності і тиску насичених парів. Зі зміною № 1.» (1999). 14 с.
- [21] Терешин, В.И., Совлуков А.С. (2016). Повышение точности измерений массы нефтепродуктов при применении радиочастотных датчиков. В сб. IV Международной метрологической конференции «Актуальные вопросы метрологического обеспечения измерений расхода и количества жидкостей и газов», Казань, Россия. С. 70–75.
- [22] Schmidt, J. W., & Lemmon, E. W. (2003). Dielectric Permittivity of Eight Gases Measured with Cross Capacitors. *International Journal of Thermophysics*, 24(2), 375–403.
- [23] Younglove, B. A., & Ely, J. F. (1987). Thermophysical properties of fluids. II. Methane, Ethane, Propane, Isobutane and Normal Butane. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 16(4), 577–798.
- [24] Maya, E. F., Edwardsa, T. J., Manna, A. G., & Manning, D. K. (2004). Density, dielectric constant and PVT measurements of a gas condensate fluid. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 41, 297–308.