

Введение Уже долгое время в нашей стране, сжиженные углеводородные газы (далее – СУГ) используются в качестве автомобильного топлива [1] и экспортируются [2] за рубеж. СУГ представляет смесь сжиженных лёгких углеводородов под давлением. Основными параметрами, необходимыми для косвенных измерений массы жидкой фазы СУГ при хранении в резервуарах (мерах вместимости), являются объем, занимаемый СУГ, и плотность жидкой фазы. В связи с дороговизной оснащения резервуарных парков хранения СУГ погружными плотномерами, широкое распространение на практике получил расчетный метод определения плотности СУГ на основе компонентного состава. Однако, не известна оценка погрешности определения плотности жидкой фазы СУГ расчетным методом по ГОСТ 28656 [3] на основе измерения содержания компонентов по ГОСТ Р 54484 [4]. В связи с этим существует проблема по организации косвенных измерений массы СУГ с нормированной точностью.

1. Теоретический материал Плотность вычисляют по ГОСТ 28656 по компонентному составу, определенному газохроматографическим методом измерений по ГОСТ Р 54484. Этот стандартизованный метод основан на разделении компонентов в газоадсорбционном и/или газожидкостном вариантах хроматографии. Плотность СУГ, кг/м³, вычисляют по формуле (1):
$$\rho = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \rho_i$$
 где w_i – массовая доля i -го компонента, %; ρ_i – плотность i -го компонента при данной температуре, кг/м³ (по таблице №3 ГОСТ 28656); n – число компонентов СУГ. При выполнении измерений плотности СУГ в лаборатории соблюдают следующие условия: - температура окружающего воздуха в пределах от 15 до 25 °С; - атмосферное давление в пределах от 96 до 104 кПа; - относительная влажность воздуха в пределах от 30 до 80 %. При определении плотности СУГ расчетным методом по ГОСТ 28656, значение абсолютной погрешности определения плотности жидкой фазы СУГ при температуре 15°С, %, будет определяться по формуле (2):
$$\Delta \rho = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \Delta w_i$$
 где $\Delta \rho$ – абсолютная погрешность определения массовой доли i -го компонента в СУГ, %; Δw_i – коэффициент влияния содержания i -го компонента в СУГ на плотность жидкой фазы СУГ рассчитываемый по формуле (3):
$$\Delta w_i = \frac{\Delta \rho_i}{\rho_i}$$
 где $\Delta \rho_i$ – абсолютная погрешность определения плотности i -го компонента СУГ при 15 °С, кг/м³; ρ_i – коэффициент влияния плотности i -го компонента СУГ на плотность жидкой фазы СУГ рассчитываемы по формуле (4):
$$\Delta w_i = \frac{\Delta \rho_i}{\rho_i}$$
 (4) Относительную погрешность определения плотности жидкой фазы СУГ, %, рассчитывают по формуле (5):
$$\Delta \rho_{\text{отн}} = \frac{\Delta \rho}{\rho}$$
 (5) Значение абсолютной погрешности определения массовой доли i -го компонента СУГ вычисляют по формуле (6):
$$\Delta w_i = \frac{\Delta \rho_i}{\rho_i}$$
 (6) где $\Delta \rho_i$ – абсолютная погрешность определения молярной доли i -го компонента согласно ГОСТ Р 54484. В данной работе приведен анализ результатов расчетного метода определения плотности сжиженных углеводородных газов различного компонентного состава, и показателей точности этого метода относительно экспериментальных данных.

2. Экспериментальная часть В ходе работы для анализа расчетного метода было выбрано три товарных марки по ГОСТ Р 25087–2003 [5] сжиженных

углеводородных газов: 1) пропан технический (ПТ); 2) бутан технический (БТ); 3) смесь пропан-бутан техническая (ПБТ). 2.1 Плотность пропана технического Был выбран следующий компонентный состав ПТ (табл. 1). Таблица 1 -

Компонентный состав ПТ

Наименование компонента	Содержание компонента X_i , % мол. долей
Этан	0,62
Пропан	98,0
Пропен	0,04
Изобутан	0,25
н-Бутан	0,85

Бутен-1	0,1
Изобутен	0,04
транс-Бутен-2	0,04
цис-Бутен-2	0,01
Изопентан	0,02
н-Пентан	0,01
2,2-Диметилпропан	0,01
Гексан	0,01

В системах измерения массы СУГ косвенным методом согласно СТО Газпром 5.9-2007 [6] применяется подход, основанный на пересчете плотности СУГ при температуре 15 °С и давлении насыщенных паров к рабочим условиям. Поэтому задача исследования сводится к оценке погрешности в состоянии насыщения. Пересчет значений молярной доли компонентов СУГ в значения массовой доли производился по формуле (7):

(7) Значения молярной массы компонентов СУГ представлены на рис. 1. Рис. 1 - Значения молярной массы

Значения для компонентов СУГ и результаты их сравнения с экспериментальными данными [7]-[13] приведены в таблице 2. Таблица 2- Значения плотности компонентов

Наименование компонента	Плотность компонента при 15°C, кг/м ³ ГОСТ Эксп.	Плотность компонента при 15°C, кг/м ³
Этан	361,1	357,85 ±0,9
Пропан	508,6	507,5 ±0,2
Пропен	522,7	522,99 ±0,06
Изобутан	563,4	562,95 ±0,08
н-Бутан	584,6	584,25 ±0,06
Бутен-1	600,5	600,52 ±0,003
Изобутен	600,6	600,72 ±0,02
транс-Бутен-2	610,6	610,35 ±0,04
цис-Бутен-2	628,6	627,18 ±0,2
Изопентан	624,5	625,03 ±0,08
н-Пентан	631,1	630,56 ±0,09
2,2-Диметилпропан	598	595,31 ±0,5
Гексан	663,9	663,82 ±0,01

Абсолютные погрешности определения плотности индивидуальных углеводородов при 15 °С представлены на рис. 2, (, кг/м³): Рис. 2 - Абсолютные погрешности определения плотности

Для полученных исходных данных рассчитано значение плотности по формуле (1) и его абсолютная погрешность по формулам (2), (3), (4):

Таким образом, получаем значение относительной погрешности определения плотности СУГ по ГОСТ 28656-90: 2.2

Определение плотности БТ, ПБТ Аналогичным образом были рассчитаны погрешности определения плотности для БТ, ПБТ. Для следующего

компонентного состава бутана технического представленного на рис. 3. Рис. 3 - Компонентный состав БТ

В ходе расчетов получили следующие значения плотности и абсолютной погрешности: , Относительная погрешность определения плотности по ГОСТ 28656-90: Компонентный состав смеси пропан-бутан технической представлен на рис. 4. Рис. 4 - Компонентный состав ПБТ

Значение плотности и абсолютной погрешности: , Относительная погрешность определения плотности: 3. Выводы Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности оценки показателей точности измерений массы СУГ в резервуарах при хранении. Очевидно следует, что при допусковой погрешности измерений массы ± 1,5% согласно РД 39-083-91 [14], расчетный метод определения плотности может быть использован не для всех марок СУГ. Исходя из полученных данных, расчетный метод рекомендуется

использовать при определении плотности товарных марок ПТ и БТ. Погрешность определения плотности для данных марок удовлетворяет требованиям, предъявляемым к точности измерения массы СУГ