

Korchagin Pavel Aleksandrovich (Russian Federation, Omsk) – doctor of technical sciences, professor of the department “Mechanics” of the Siberian State Automobile and Highway academy (SibADI). (644080, Omsk, Mira Ave., 5, email: korchagin\_pa@mail.ru)

Teterina Irina Alekseevna (Russian Federation, Omsk) – graduate student of the department “Mechanics” of the Siberian State Automobile and Highway academy (SibADI). (644080, Omsk, Mira Ave., 5, email: teterina\_ia@sibadi.org).

УДК 621.439:629.114.5

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ СЖИЖЕННОГО УГЛЕВОДОРОДНОГО ГАЗА НА ВРЕМЯ СЛИВА ГАЗА ИЗ АВТОМОБИЛЬНОГО БАЛЛОНА

Н. Г. Певнев, В. И. Гурдин, Э. Р. Раенбагина  
ФГБОУ ВПО «СибАДИ», Россия, г. Омск.

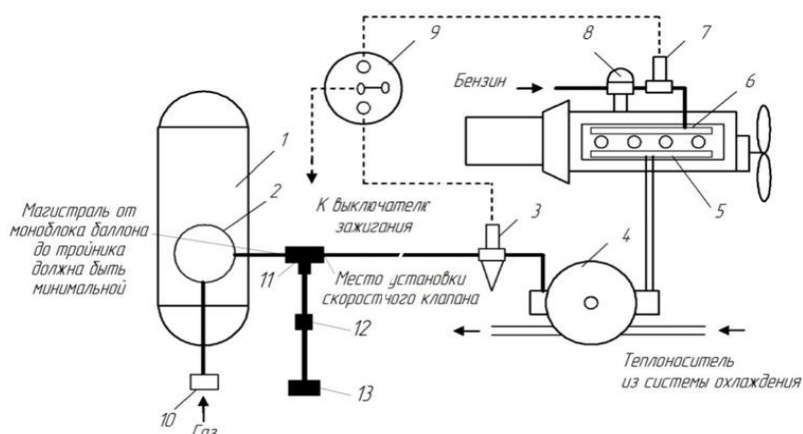
**Аннотация.** Статья посвящена актуальной на сегодняшний день проблеме – безопасному, цивилизованному сливу жидкой фазы углеводородного пропан-бутанового газа из автомобильного баллона. Для выполнения этого условия описывается принципиальная схема модернизированной авторами системы питания двигателя газом в случае использования баллона с мультиклапаном. Представлены результаты исследования термодинамических показателей жидкой и паровой фаз, характеризующих процесс слива сжиженного углеводородного газа (СУГ) из автомобильного баллона и выявлены закономерности изменения параметров состояния СУГ от температуры окружающего воздуха.

**Ключевые слова:** СУГ, автомобильный баллон, слив газа, упругость паров, молярная доля, двухфазная система, энтальпия.

#### Введение

Технологический процесс слива СУГ из автомобильных газовых баллонов является одной из специфических операций при технической эксплуатации газобаллонных автомобилей (ГБА). Согласно требованиям нормативной документации, касающейся технической эксплуатации ГБА, слив СУГ

можно производить только на специализированных постах слива СУГ, располагаемых на АГЗС, либо на АТП. При этом система питания ГБА с автомобильным газовым баллоном, оборудованным мультиклапаном, должна быть дооборудована магистралью слива СУГ (рисунок 1) [1].



1 – газовый баллон; 2 – мультиклапан; 3 – магистральный газовый клапан; 4 – газовый редуктор; 5 – рампа газовая; 6 – рампа бензиновая; 7 – бензиновый клапан; 8 – бензонасос; 9 – тумблер переключения вида питания; 10 – ВЗУ; 11 – тройник со скоростным клапаном; 12 – вентиль слива газа; 13 – ВЗУ без обратного клапана для слива газа.

Рис. 1. Принципиальная схема модернизированной системы питания двигателя газом в случае использования баллона с мультиклапаном

Полный слив СУГ из автомобильного газового баллона возможно произвести только путем выдавливания из него избыточным давлением и перемещения в сливной резервуар жидкой фазы СУГ. Основными технологическими параметрами такого процесса слива являются: время и давление, необходимое для слива жидкой фазы. Эти параметры обуславливают продолжительность полного слива СУГ из автомобильного газового баллона, а значит, и время нахождения автомобиля на посту слива.

**Термодинамические характеристики СУГ и их влияние на время слива газа из автомобильного баллона**

СУГ представляет собой двухфазную смесь жидкость – пар. При этом пары сжиженных газов находятся в насыщенном состоянии только в том случае, если имеется свободная поверхность жидкости данного вещества в замкнутом пространстве, т.е. когда существует одновременно две фазы – жидкая и паровая. Эта двухфазная система может существовать лишь при температуре, которой будет отвечать определенная упругость паров, и, наоборот, при заданной упругости насыщенного пара система жидкость – пар может существовать только при определенной температуре [2].

Процесс выдавливания жидкой фазы СУГ из автомобильного газового баллона в сливной резервуар является адиабатическим, т.к. передачи тепла от молекул газа стенкам

сливной магистрали не происходит [3]. Никаких химических превращений в газовом баллоне не происходит, меняются только параметры жидкой и паровой фазы. При этом основными параметрами состояния смеси СУГ в газовом баллоне являются абсолютное давление  $p$ , плотность  $\rho$  и абсолютная температура  $T$ . Эти три параметра носят название термических параметров состояния [4]. Для полной характеристики состояния жидкой и паровой фаз необходимо знать давление  $p$  и плотность  $\rho$  СУГ.

Сжиженные углеводородные газы взаимно растворяются друг в друге, образуя механическую смесь, поэтому к ним при незначительно высоких давлениях с достаточной точностью (для практических вычислений) применим закон Рауля (закон аддитивности) [5]:

$$P_i = \rho'_i \cdot r_i, \quad (1)$$

где  $P_i$  – парциальное давление пара каждого компонента жидкой смеси, Па;  $\rho'_i$  – упругость паров чистого компонента  $i$ ;  $r_i$  – молярная доля компонента  $i$  в жидкой смеси.

Для определения термодинамических показателей жидкой и паровой фазы смеси СУГ были определены концентрации компонентов в жидкой и паровой фазах в молярных долях для диапазона температур от минус 35 до плюс 30°C при следующих массовых долях компонентов:  $C_3H_8$  – 43%,  $C_4H_{10}$  – 57% [5, 6] (таблица 1).

Таблица 1 – Определение концентрации компонентов паровой и жидкой фаз СУГ в молярных долях и общей упругости паров

Температура $t$ , °C	Концентрация пропана в равновесной паровой фазе $r_{C_3H_8}$	Концентрация бутана в равновесной паровой фазе $r_{C_4H_{10}}$	Концентрация пропана в равновесной жидкой фазе $x_{C_3H_8}$	Концентрация бутана в равновесной жидкой фазе $x_{C_4H_{10}}$	Общая упругость паровой фазы СУГ $p$ , МПа
-35	1	-	-	1	0,072
-30	1	-	-	1	0,089
-25	1	-	-	1	0,106
-20	1	-	-	1	0,127
-15	0,857	0,143	0,187	0,813	0,180
-10	0,854	0,146	0,191	0,809	0,214
-5	0,848	0,152	0,198	0,802	0,254
0	0,843	0,157	0,204	0,796	0,299
5	0,838	0,162	0,210	0,790	0,350
10	0,835	0,165	0,214	0,786	0,407
15	0,830	0,170	0,220	0,780	0,471
20	0,827	0,173	0,224	0,776	0,544
25	0,823	0,177	0,228	0,772	0,624
30	0,763	0,237	0,233	0,767	0,764

Для определения плотности жидкой фазы СУГ при заданном компонентном составе и температуре окружающего воздуха необходимо знать плотность ее компонентов. Плотность компонентов СУГ при температуре воздуха от  $-35^{\circ}\text{C}$  до  $+30^{\circ}\text{C}$  указана в таблице 1 [7].

Средняя плотность жидкой фазы СУГ определяется по правилу смешения [5]:

$$\rho_{\text{см}} = 100 / (g_1 / \rho_1 + g_2 / \rho_2 + \dots + g_n / \rho_n), \quad (2)$$

где  $g_1, g_2, \dots, g_n$  – массовая доля компонента смеси, %;  $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$  – плотность компонента смеси при данной температуре,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Расчетные значения плотности жидкой фазы пропана, бутана и СУГ приведены в таблице 2.

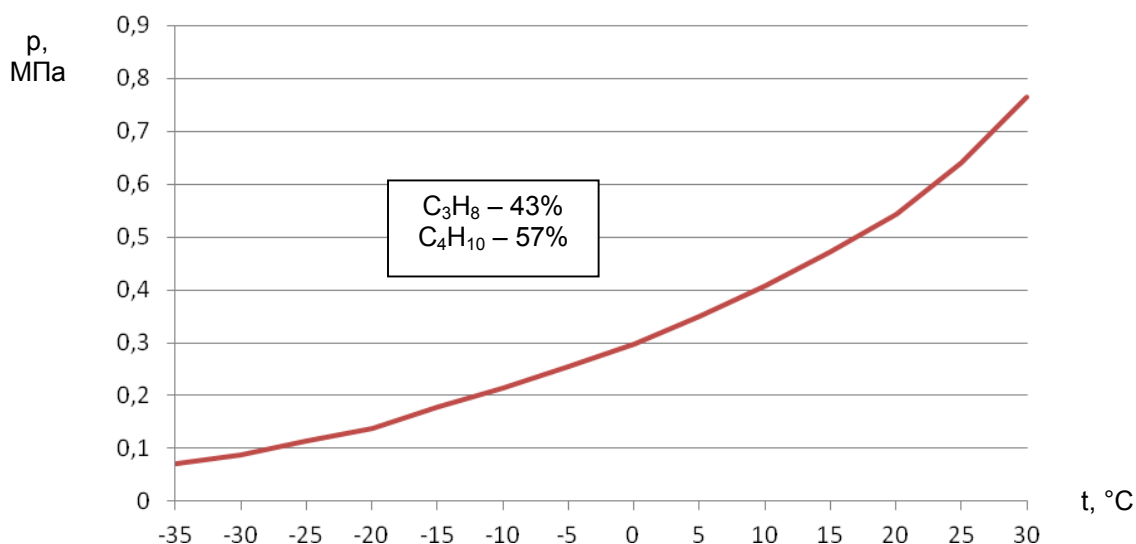


Рис. 2. Зависимость упругости паровой фазы СУГ от температуры

Таблица 2 – Плотность жидкой фазы СУГ

Температура $t, ^{\circ}\text{C}$	Плотность пропана $\rho_{\text{пропан}}, \text{кг}/\text{м}^3$	Плотность бутана $\rho_{\text{бутан}}, \text{кг}/\text{м}^3$	Плотность СУГ $\rho, \text{кг}/\text{м}^3$
-35	0,573	0,637	0,601
-30	0,568	0,632	0,596
-25	0,562	0,627	0,590
-20	0,556	0,622	0,585
-15	0,549	0,617	0,578
-10	0,543	0,611	0,572
-5	0,536	0,607	0,566
0	0,530	0,601	0,560
5	0,523	0,596	0,554
10	0,516	0,590	0,548
15	0,509	0,585	0,541
20	0,501	0,579	0,534
25	0,493	0,573	0,527
30	0,485	0,567	0,520

К параметрам состояния относятся также внутренняя энергия  $U$ , энтальпия  $I$  и энтропия  $S$ , которые носят название калорических параметров состояния.

Энтальпия, или общее теплосодержание системы, представляет собой количество тепла, необходимое для повышения температуры 1 кг вещества от абсолютного нуля до заданной температуры, т.е. является

функцией температуры и давления [3]. Энтальпия – аддитивная функция, т.е. энтальпия всей системы равна сумме энтальпий составляющих её частей [2]. Энтальпия системы определяется суммированием энтальпий парогазовой и жидкой фаз с учетом компонентного содержания:

$$I = I_{\text{п}} + I_{\text{ж}}, \quad (3)$$

где  $I_{II}$  – энтальпия паровой фазы СУГ, кДж;  $I_{Ж}$  – энтальпия жидкой фазы СУГ, кДж.

Энтальпия паровой и жидкой фаз СУГ равна:

$$I_{II} = C_{pi} \cdot r_i \cdot t; \quad (4)$$

$$I_{Ж} = C_{Жи} \cdot r_i \cdot t, \quad (5)$$

где  $C_{pi}$  – массовая теплоемкость компонента  $i$  парогазовой смеси при постоянном давлении, кал/(г·°С);  $C_{Жи}$  – теплоемкость компонента  $i$  жидкой смеси, кал/(г·°С);  $r_i$  – молярная доля компонента  $i$  в смеси.

Теплоемкость жидкой и паровой фазы смеси СУГ зависит от концентрации компонентов смеси в жидкой и паровой фазах. Теплоемкость компонентов пропана и бутана  $C_p$  в жидком и газообразном состоянии в зависимости от температуры и давления смеси выбраны из справочника [8] и представлены в таблице 3.

Теплоемкость парогазовой и жидкой фаз СУГ определяется [2]:

$$C_p = C_i \cdot r_i, \quad (6)$$

где  $C_i$  – теплоемкость компонента  $i$  жидкой смеси, кал/(г·°С);  $r_i$  – молярная доля компонента  $i$  в жидкой смеси.

Таблица 3 – Теплоемкость паровой и жидкой фаз пропана, бутана и СУГ

Температура $t$ , °С	Теплоемкость паровой фазы пропана $C_p$ , кал/(г·°С)	Теплоемкость паровой фазы бутана $C_p$ , кал/(г·°С)	Теплоемкость паровой фазы СУГ $C_p$ , кал/(г·°С)	Теплоемкость жидкой фазы пропана $C_p$ , кал/(г·°С)	Теплоемкость жидкой фазы бутана $C_p$ , кал/(г·°С)	Теплоемкость жидкой фазы СУГ $C_p$ , кал/(г·°С)
-35	0,344	-	0,344	-	0,516	0,516
-30	0,347	-	0,347	-	0,521	0,521
-25	0,364	-	0,364	-	0,525	0,525
-20	0,365	-	0,365	-	0,530	0,530
-15	0,366	0,361	0,365	0,545	0,534	0,535
-10	0,368	0,366	0,368	0,550	0,539	0,540
-5	0,381	0,371	0,379	0,556	0,544	0,546
0	0,391	0,376	0,388	0,565	0,549	0,551
5	0,401	0,381	0,396	0,574	0,554	0,557
10	0,411	0,386	0,405	0,587	0,559	0,563
15	0,417	0,391	0,411	0,599	0,565	0,570
20	0,435	0,396	0,425	0,615	0,571	0,578
25	0,437	0,401	0,428	0,631	0,576	0,585
30	0,472	0,406	0,450	0,648	0,581	0,592

Энтальпия паровой и жидкой фаз СУГ в баллоне с учетом компонентного содержания представлена в таблице 4.

Таблица 4 – Энтальпия паровой и жидкой фаз смеси СУГ в баллоне

Температура $t$ , °С	Энтальпия паровой фазы СУГ $I_{II}$ , кДж/кг	Энтальпия жидкой фазы СУГ $I_{Ж}$ , кДж/кг	Энтальпия СУГ в баллоне $I$ , кДж/кг
-35	343,8	515,8	859,6
-30	354,1	531,8	885,9
-25	379,1	546,9	926
-20	387,8	563,2	951
-15	395,5	580,2	975,7
-10	406	597	1003
-5	426,4	614,2	1040,6
0	444,5	632	1076,5
5	462,8	650	1113
10	481,5	669,5	1151
15	496,8	689,7	1186,5
20	523,5	711,1	1234,6
25	535,7	731,9	1267,6
30	573,3	753,3	1326,6

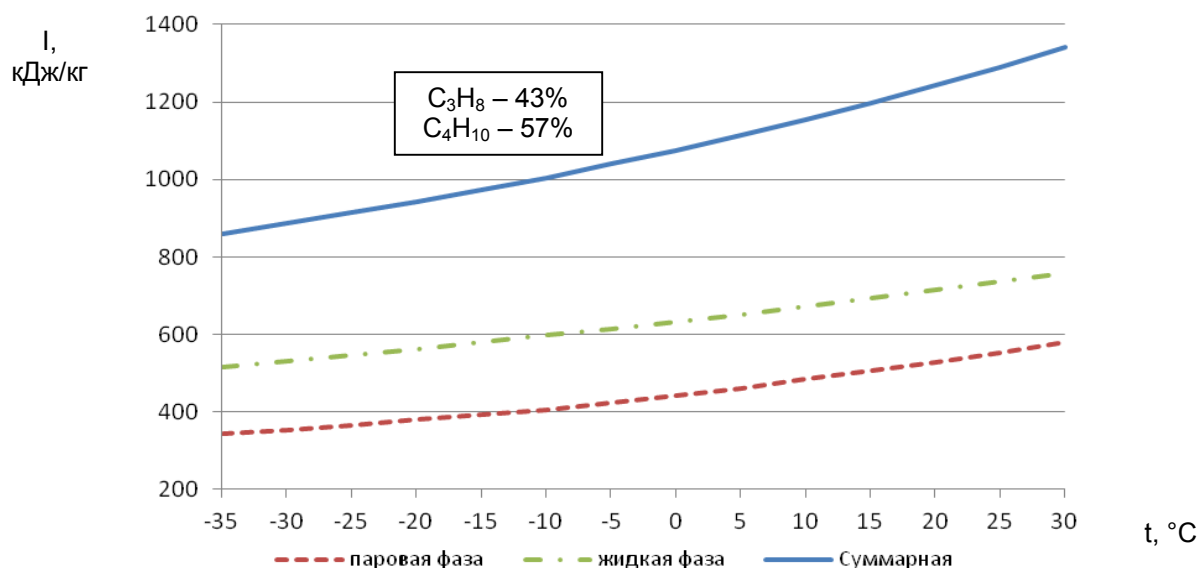


Рис. 3. Зависимость энтальпии СУГ от температуры окружающего воздуха

Для определения скорости потока СУГ в отверстии используется закон сохранения энергии адиабатического процесса. Баланс энергии адиабатического процесса описывается уравнением Бернулли [9]:

$$I + \frac{v^2}{2} = I_0 = const, \quad (7)$$

где  $v$  – скорость течения газа, м/с;  $I$  – энтальпия в сечении потока, кДж/кг;  $I_0$  – полная энтальпия газа в баллоне, кДж/кг.

Из формулы (7) следует, что максимальная скорость потока достигается в том случае, когда энтальпия потока равна

нулю, т.е. когда полная энтальпия целиком расходуется на кинетическую энергию перемещения массы газа в соответствии с уравнением:

$$\frac{v_{max}^2}{2} = I_0. \quad (8)$$

Таким образом, максимально возможная скорость потока СУГ в отверстии определяется:

$$v_{max} = \sqrt{2I_0}. \quad (9)$$

На рисунке 4 представлена зависимость скорости потока СУГ от температуры.

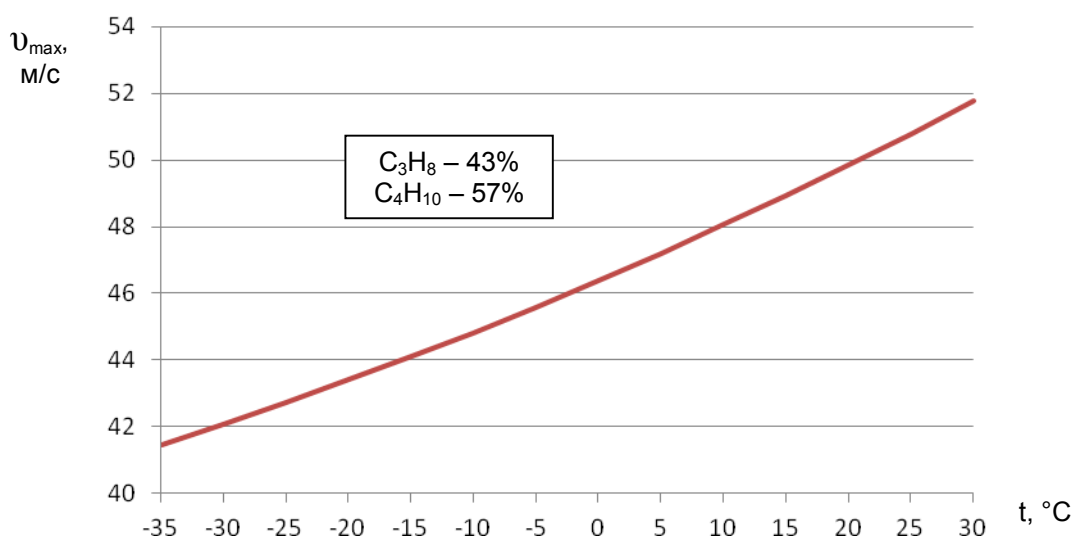


Рис. 4. Зависимость скорости потока СУГ от температуры окружающего воздуха

Минимально возможное время слива СУГ  $\tau_{\min}$  зависит от объема СУГ в баллоне и определяется из условия постоянства расхода через ВЗУ слива. Минимальное время рассчитывается по формуле:

$$\tau_{\min} = \frac{V}{v_{\max} \cdot S}, \quad (10)$$

где  $V$  – объем СУГ в баллоне  $\text{м}^3$ ;  $S$  – площадь сечения заборной трубки баллона,  $\text{м}^2$ .

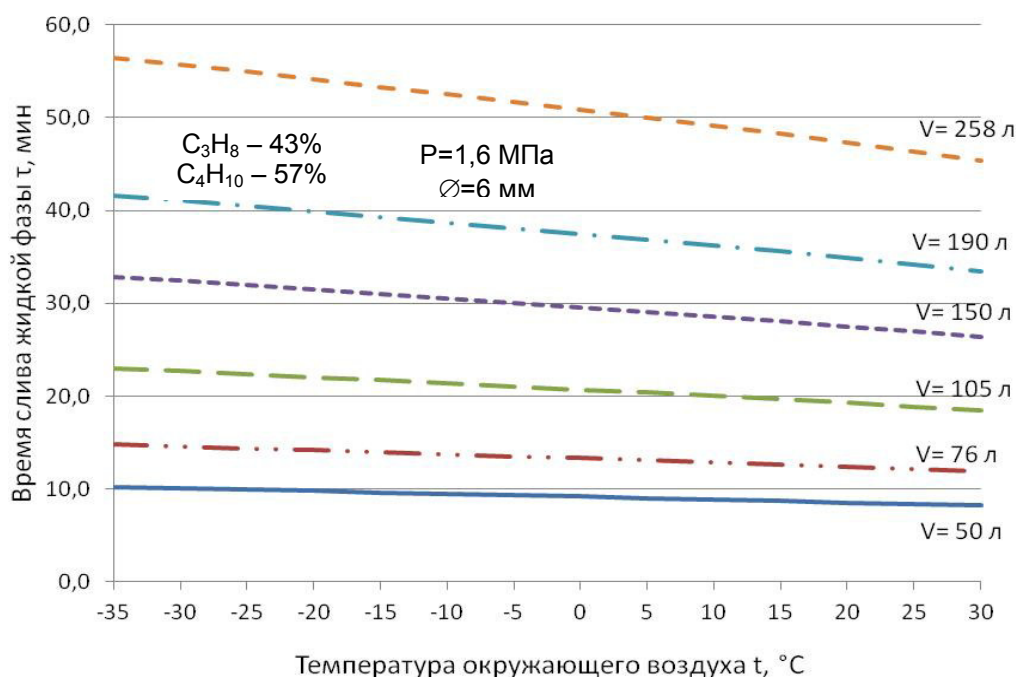


Рис. 5. Зависимость времени слива СУГ из баллонов различного объема от температуры окружающей среды

### Выводы

1. В результате проведенных исследований определены параметры состояния СУГ (таблицы 1, 2, 3, 4) в заданном диапазоне температур, которые характерны для условий эксплуатации в сибирском регионе.

2. Термодинамические показатели смеси газа, приведенные в таблицах, позволяют теоретически определить скорость истечения газовой смеси и время слива имеющегося объема газа из баллона при различной температуре окружающей среды.

3. При заданных геометрических параметрах системы питания (диаметр трубки, длина трубопровода) и составе газа с преобладающим содержанием пропана и бутана, на основании проведенных исследований можно утверждать, что время опорожнения баллона зависит от температуры окружающей среды незначительно.

### Библиографический список

1. Полез. модель 90137 РФ : МПК F 02 M 21/02: Двухтопливная система питания двигателя / Н.Г. Певнев, Э.Р. Раенбагина, А.П. Елгин; ФГБОУ ВПО СибАДИ. – № 2009132044/22; заявл. 25.08.2009; опубл. 27.12.2009, Бюл. № 36.
2. Кудинов, В.А. Техническая термодинамика: учебное пособие для вузов / В.А. Кудинов, Э.М. Карташов. – М.: Высшая школа, 2000. – 262 с.
3. Ляшков, В.И. Теоретические основы теплотехники: учеб. пособие. 2-е изд., стер. / В.И. Ляшков. – М.: Машиностроение-1, 2005. – 260 с.
4. Термодинамика. Часть 1. Основной курс: учебное пособие / В.П. Бурдаков и др. – М.: Дрофа, 2009. – 479 с.
5. Стаскевич, Н.Л. Справочник по сжиженным углеводородным газам / Н.Л. Стаскевич, Д.Я. Вигдорчик. – Л.: Недра, 1986. – 543 с.
6. Банкет, М.В. Обеспечение работоспособности газобаллонных автомобилей в условиях отрицательных температур окружающей среды : дис. канд. техн. наук : 05.22.10 / М.В. Банкет ; научн. рук. проф. Н.Г. Певнев ; СибАДИ. – Омск, 2012. – 146 с.
7. ГОСТ 28656-90. Газы углеводородные сжиженные. Расчетный метод определения плотности и давления насыщенных паров. Введ.

1991-07-01. – М.: Стандартинформ, 1990. –17 с.

8. Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик. – М.: Физматгиз. – 1963. – 708 с.

9. Христианович, С.А. Прикладная газовая динамика / С.А. Христианович, В.Г. Гальперин, М.Д. Миллионщиков. – М.: ЦАГИ, 1948. – 144 с.

### INFLUENCE OF PARAMETERS OF THE LIQUEFIED PETROL GAS' STATE ON THE TIME OF A GAS' DISCHARGE FROM THE AUTOMOBILE GAS CYLINDER

N.G. Pevnev, V.I. Gurdin, E.R. Raenbagina

**Abstract.** The article is devoted to the current problem - safe, civilized discharge of liquid phase of the hydrocarbonic, propane, butane gas from the automobile gas cylinder. For implementing this condition there is described the functional diagram of the modernized system of supplying engine with gas in case of using the cylinder with a multivalve. There are presented results of investigating thermodynamic indexes of liquid and steam phases, characterizing the process of discharging liquefied petrol gas from the automobile gas cylinder. The regularities of changing parameters of liquefied petrol gas's condition from the outer air's temperature are revealed.

**Keywords:** liquefied petrol gas, automobile gas cylinder, gas discharge, vapor pressure, molar fraction, diphasic system, enthalpy.

### References

1. Pevnev N.G., Raenbagina E.R., Elgin A.P. Dvuhtoplivnaja sistema pitaniya dvigatelja [Dual-fuel system of feeding engine]. Polez. model' no 2009132044/22, 2009.

2. Kudinov V.A., Kartashov E.M. *Tehnicheskaja termodinamika: uchebnoe posobie dlja vuzov* [Technical thermodynamics: textbook for universities]. Moscow, Vysshaja shkola, 2000. 262 p.

3. Lyashkov V.I. *Teoreticheskie osnovy teplotehniki: ucheb. Posobie* [Theoretical bases of heating engineering]. Moscow, Mashinostroenie-1, 2005. 260 p.

4. Burdakov V. P. *Termodinamika. Osnovnoj kurs: uchebnoe posobie* [Thermodynamics. Basic course: textbook]. Moscow, Drofa, 2009. 479 p.

5. Staskevich N.L., Vigdorichik D. Y. *Spravochnik po szhizhennym uglevodorodnym gazam* [Reference book on the condensated hydrocarbon gases]. Leningrad, Nedra, 1986. 543 p.

6. Banket M.V. *Obespechenie rabotosposobnosti gazoballonnyh avtomobilej v uslovijah otricatel'nyh temperatur okružhajushhego vozduha. Dis. kand.*

*tehn. nauk* [Providing capacity of compressed gas vehicles in the conditions of negative temperatures of outer air. *Dis. kand. tehn. nauk*]. Omsk, SibADI, 2012. 146 p.

7. GOST 28656-90. Gazy uglevodorodnye szhizhennye. Raschetnyj metod opredelenija plotnosti i davlenija nasyshhennyh parov. Vved. 1991-07-01. [State standard 28656-90. Hydrocarbon condensated gases. Calculation method of determining density and pressure of the saturated steams]. Moscow, Standartinform, 1990.

8. Vargaftik N.B. *Spravochnik po teplofizicheskim svojstvam gazov i zhidkostej* [Reference book on thermophysical properties of gases and liquids]. Moscow, Fizmatgiz. 1963. 708 p.

9. Hristianovich S.A. Galperin V.G., Millionshhikov M.D. *Prikladnaja gazovaja dinamika* [Applied gas dynamics]. Moscow, CAGI, 1948. 144 p.

*Певнев Николай Гаврилович (Россия, г. Омск) – доктор технических наук, профессор кафедры «Эксплуатация и ремонт автомобилей» ФГБОУ ВПО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: pevnev\_ng@sibadi.org).*

*Гурдин Виктор Иванович (Россия, г. Омск) – доктор технических наук, профессор кафедры «Эксплуатация и ремонт автомобилей» ФГБОУ ВПО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: eira\_254@mail.ru).*

*Раенбагина Эльмира Рашидовна (Россия, г. Омск) – старший преподаватель кафедры «Эксплуатация и ремонт автомобилей» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: elfs2004@yandex.ru).*

*Pevnev Nikolay Gavrilovich (Russian Federation, Omsk) – doctor of technical science, professor of the department “Maintenance and repair of vehicles”, Siberian State Automobile and Highway academy (SibADI), (644080, Omsk, prospect Mira, 5, e-mail: pevnev\_ng@sibadi.org)*

*Gurdin Victor Ivanovich (Russian Federation, Omsk) – doctor of technical science, professor of the department “Maintenance and repair of vehicles”, Siberian State Automobile and Highway academy (SibADI), (644080, Omsk, prospect Mira, 5, e-mail: eira\_254@mail.ru)*

*Raenbagina Elmira Rashidovna (Russian Federation, Omsk) – senior lecturer of the department “Maintenance and repair of vehicles”, Siberian State Automobile and Highway academy (SibADI) (644080, Omsk, prospect Mira, 5, e-mail: elfs2004@yandex.ru)*