

плексного топливно-экологического критерия: Монография. – Харьков: Изд. Центр НТУ «ХПИ», 2003. – 244 с. 3. Regulation № 49. Revision 2. Uniform provision concerning the approval of compression ignition (C.I.) engines and vehicles equipped with C.I. engines with the regard to the emission of pollutants by the engine. Geneva, 1992. – 114 p. 4. Regulation № 96. Uniform provision concerning the approval of compression ignition (C.I.) engines to be installed in agricultural and

forestry tractors with regard to the emissions of pollutants by the engine. Geneva, 1995. – 109 p. 5. ISO 8178. Reciprocating internal combustion engines – Exhaust emission measurement – Part 1: Test – bed measurement of gaseous and particulate exhaust emissions, 1996. – 94 p. 6. Звонов В.А., Корнилов Г.С., Козлов В.А., Симонова Е.А. Оценка и контроль выбросов дисперсных частиц с отработавшими газами дизелей. – М.: Издательство Прима-Пресс-М, 2005. – 312 с.

УДК 621.43

Н.К. Шокотов, д-р техн. наук, Е.И. Янтовский, д-р техн. наук

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ХИМИЧЕСКИ ЧИСТОГО АВТОМОБИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ БЕЗ НАДУВА НА РАЗЛИЧНЫХ ТОПЛИВАХ

Рассматривается эффективность химически чистого (безвыбросного) автомобильного двигателя без наддува при его работе на бензине, пропане и метане, в котором осуществлено внутреннее форсирование путем изменения мольной доли кислорода в окислителе.

На рис.1а показана предлагаемая схема химически чистой силовой установки, состоящей из поршневого двигателя (VM), системы образования исходного заряда и расположенной между ними системы кислородоснабжения [1, 2, 3, 4].

В качестве VM принят разработанный фирмой Volkswagen и ее филиалами в США [5] рядный, четырехтактный ($i = 4$), четырехцилиндровый ($z = 4$) с соотношением хода поршня к диаметру цилиндра $S/D = 68,4/79,5$ двигатель, который при степени

сжатия $\varepsilon = 8,3$ и частоте вращения коленчатого вала $n = 5000 \text{ мин}^{-1}$ развивает на стенде эффективную мощность $N_e = 48 \text{ кВт}$.

Система образования исходного заряда состоит из доохладителя потоков отработавшего газа и кислорода $M_{28} = M_{O_2}(R4)$, где M''_{CO_2} , M''_{H_2O} , M'''_{CO_2} – соответственно образующиеся при горении диоксид углерода и пары воды, а также транзитный диоксид углерода; водного сепаратора (WS), отводящего водный конденсат; разделителя потока сухого диоксида углерода (AB) на $M_9 = M''_{CO_2}$ и $M_7 = M'''_{CO_2}$, смесителя исходных элементов заряда (M_i), т.е. суммы $M_1 = M_s = M_B + M_{O_2} + M'''_{CO_2}$, где M_B – поток топлива, а $M_{Ox} = M_{O_2} + M'''_{CO_2}$ – поток окислителя.

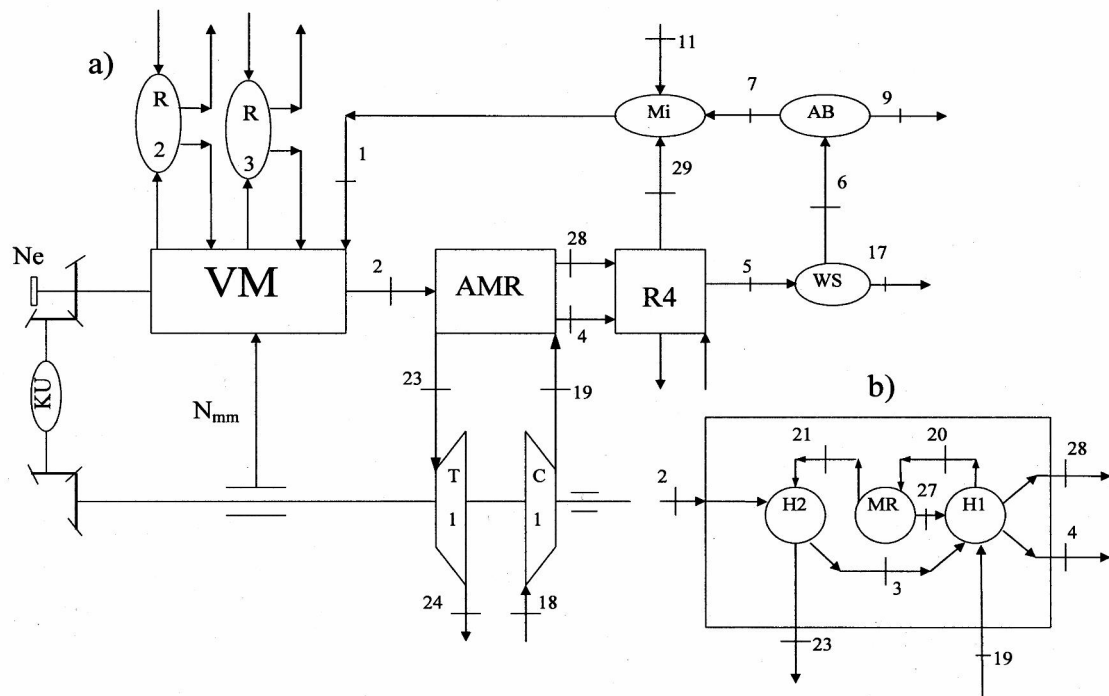


Рис.1. Схема химически чистой силовой установки

Выбор такой дополнительной системы диктуется необходимостью реализации в силовой установке замкнутого цикла 1–2–4–5–6–7–1.

Система кислородоснабжения состоит из воздушного компрессора C1, автомобильного мембранного реактора AMR [6, 7] и воздушной турбины T1. Использование C1 и T1 в силовой установке без наддува обусловлено необходимостью создания условий для эффективного отделения кислорода от потока воздуха в AMR. Реактор AMR (рис.1б) состоит из нагревателей H1 и H2 и расположенного между ними мембранного (из керамических пластин) реактора MR. После C1 поток воздуха $M_{19} = M_L$ нагревается продуктами сгорания (поток 3) и направляется в MR (поток 20). При этом обеспечивается нагрев керамических пластин до $t_m = 800 \div 1000$ °C и отношение парциальных давлений кислорода над и под мембраной $\pi_{O_2} \geq 3,0$ [6, 7]. Отдав кислород в количестве M_{O_2} (поток 27), воздух M_{21} поступает в H2, где продуктами сгорания M_2 нагревается до температуры

$T_{23} = T_2 - 20$ и в качестве рабочего тела турбины $M_{23} = M_T = M_L - M_{O_2}$ направляется к T1.

В системе кислородоснабжения реализуется вспомогательный цикл 18–19–20–21–23–24, в ходе которого отбирается M_{O_2} и вырабатывается дополнительная мощность $N_{KT} = N_{T1L} - N_{C1L} - N_{mm}$, где N_{T1L} – мощность турбины, N_{C1L} – мощность на привод компрессора, N_{mm} – потери мощности на трение в подшипниках лопаточных машин, обгонной муфте KU и редукторе.

Потоки $M_9 = M''_{CO_2}$ и $M_{17} = M''_{H_2O}$ выводят M''_{CO_2} и M''_{H_2O} из цикла, а поток M_9 далее сжимается, сжимается и транспортируется для захоронения.

Потоки топлива $M_{11} = M_B$ и воздуха $M_{18} = M_L$ подводятся из окружающей среды, потоки воздуха $M_{24} = M_T$ и воды $M_{17} = M_{H_2O}$ отводятся в окружающую среду. Радиаторные секции R2 и R3 служат для отвода в окружающую среду теплоты соответственно от масла и воды.

В табл. 1 для метана (CH_4), пропана (C_3H_8) и бензина (C_nH_m) приведены значения мольных долей элементов заряда M_S в зависимости от мольной доли кислорода в окислителе O_{24} , коэффициента избытка окислителя α и теоретически необходимого количества кислорода для окисления 1 кмоль углеводородного топлива $\tilde{\text{O}}_{2M} : \mu_B = 1 / (1 + \alpha \tilde{\text{O}}_{2M} / \text{O}_{24})$ – доля топлива; $\mu_{\text{O}_2} = \alpha \tilde{\text{O}}_{2M} \cdot \mu_B$ – доля кислорода; $\mu_{\text{CO}_2} = (1 - \text{O}_{24}) \cdot \mu_{\text{O}_2} / \text{O}_{24}$. Далее принимается $\alpha = 1$.

Для каждого из топлив C_nH_m в рассматриваемом случае $\tilde{\text{O}}_{2M} = n + m/4$. Так для метана $\tilde{\text{O}}_{2M} = 2,0$, для пропана $\tilde{\text{O}}_{2M} = 5,0$. Для бензина здесь принят состав: $\text{C} = 0,85$ и $\text{H} = 0,15$, а мольная масса бензина $m_B = 114$ кг/кмоль. При этом получается $n =$

8,075, $m = 17,1$ и $\tilde{\text{O}}_{2M} = 12,35$.

Видно, что при $\alpha = 1,0$ отношение μ_B / μ_{O_2} равно $\tilde{\text{O}}_{2M}$. В предлагаемом двигателе (рис. 1а) за счет суммарной поверхности мембран AMR можно обеспечить $\text{O}_{24} = 0,209$ (как и в воздухе), а также $\text{O}_{24} = 0,3$ и выше. Таким свойством обладают только предлагаемые химически чистые двигатели с мембранным реактором.

Из данных табл. 1 видно, что при повышении O_{24} , пропорционально растут μ_B , μ_{O_2} и увеличивается мольная доля эффективно подводимого к рабочему телу тепла

$$q_{1A} = \frac{Q_{1A}}{M_S} = \frac{\Delta h_{UM}}{1 + \alpha \frac{\tilde{\text{O}}_{2M}}{\text{O}_{24}}} = \Delta h_{UM} \cdot \mu_B,$$

Таблица 1. Мольные доли элементов заряда цилиндра, низшая мольная теплота сгорания и мольная располагаемая теплота топлива

Топливо	O_{24}	0,209	0,3	0,4	0,5
CH_4	μ_B	0,094613	0,13043	0,166667	0,2000
	μ_{O_2}	0,18923	0,26087	0,33333	0,4000
	μ_{CO_2}	0,71616	0,6087	0,50003	0,4000
	$\mu_{\text{O}_2} / \mu_B = \tilde{\text{O}}_{2M}$	2,0	2,0	2,0	2,0
	Δh_{UM} , кДж/кмоль	802300	802300	802300	802300
	q_{1A} , кДж/кмоль	75908,0	104644,0	133719,0	160460,0
	$\tilde{q}_{1A}$	1,0	1,379	1,762	2,114
C_3H_8	μ_B	0,04012	0,0566	0,07407	0,090909
	μ_{O_2}	0,2006	0,28302	0,37037	0,454545
	μ_{CO_2}	0,75928	0,66038	0,55556	0,454546
	$\mu_{\text{O}_2} / \mu_B = \tilde{\text{O}}_{2M}$	5,0	5,0	5,0	5,0
	Δh_{UM} , кДж/кмоль	2044000	2044000	2044000	2044000
	q_{1A} , кДж/кмоль	82005,3	115690,4	151399,1	185818,0
	$\tilde{q}_{1A}$	1,0	1,411	1,846	2,266
Бензин $\text{C}_{8,075}\text{H}_{17,1}$ (средняя)	μ_B	0,01664	0,023715	0,031373	0,038910
	μ_{O_2}	0,2055	0,29289	0,38745	0,48054
	μ_{CO_2}	0,77786	0,68340	0,58118	0,48055
	$\mu_{\text{O}_2} / \mu_B = \tilde{\text{O}}_{2M}$	12,35	12,35	12,35	12,35
	Δh_{UM} , кДж/кмоль	5004486	5004486	5004486	5004486
	q_{1A} , кДж/кмоль	83274,6	118681,4	157005,7	194724,6
	$\tilde{q}_{1A}$	1,0	1,425	1,885	2,338

что должно привести и приводит к росту среднего индикаторного p_i и среднего эффективного p_e давления, так как они зависят от среднего теплового давления

$$p_Q = q_{1A} \frac{p_0 \eta_v}{8,314 T_0},$$

где Δh_{UM} – мольная низшая теплота сгорания, p_0 и T_0 – давление и температура окружающей среды, η_v – коэффициент наполнения, приведенный к параметрам окружающей среды.

В величине $\eta_e = N_e / Q_{1A}$ наблюдаются небольшие отличия. В январе 2006 г. в Германии цена бензина (P_v) была равна 1,24 €/л, пропана – 0,639 €/л, метана (P_G) – 0,829 €/кг.

Для рассматриваемых двигателей часовой расход топлива B_q на номинальном режиме и его стоимость W_q при указанных выше ценах соответственно равны: для прототипа на бензине $B_q = 14,53$ кг/час и $W_q = 25,74$ €/час; на пропане $B_q = 13,99$ кг/час и $W_q = 17,57$ €/час; на метане – $B_q = 11,98$ кг/час и $W_q = 9,935$ €/час.

Эти данные позволяют определить удельный эффективный расход топлива $g_e = B_q / N_e$ и стоимость одного кВт·ч вырабатываемой двигателем энергии $P_r = W_q / N_e$. Между g_e и P_r имеется связь:

– при работе на бензине и пропане

$$P_r = \frac{P_v}{\rho} g_e 10^{-1} \frac{\text{центов}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}, \quad (1)$$

– при работе на метане

$$P_r = P_G g_e 10^{-1} \frac{\text{центов}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}. \quad (2)$$

Таким образом, цена 1 кВт·ч зависит как от цены топлива, так и от эффективности использования топлива в двигателе (ρ – плотность топлива).

При переходе с бензина на пропан снижается удельный эффективный расход топлива на $\Delta g_e =$

$302,7 - 284,8 = 17,9$ г/(кВт·ч), а стоимость 1 кВт·ч снижается на

$$\begin{aligned} \Delta P_r &= \frac{P_{v0} - P_{vi}}{P_{v0}} \cdot 100 = \\ &= \frac{53,62 - 35,76}{53,62} \cdot 100 = 33,3 \%. \end{aligned} \quad (3)$$

При переходе с бензина на метан экономится соответственно $\Delta g_e = 302,7 - 276,8 = 25,9$ г/(кВт·ч) и

$$\Delta P_r = \frac{53,62 - 22,95}{53,62} \cdot 100 = 57,2 \%. \text{ При сравнительном}$$

анализе экономии в стоимости расходуемого топлива по сравнению с прототипом можно вычислить также из соотношения

$$\tilde{W} = \frac{P_{v0} N_{ei} - P_{vi} N_{ei}}{P_{v0} N_{ei}} = \frac{W_0 - W_i}{W_0} = \frac{S}{W}, \quad (4)$$

где W_0 – стоимость израсходованного топлива, например, при работе на пропане (при цене 1 кВт·ч прототипа); W_i – реальная стоимость топлива за час работы на пропане; S – экономия в € за час работы двигателя на пропане по сравнению с прототипом на бензине, т.е. при работе на пропане

$$\begin{aligned} \tilde{W} &= \frac{0,5362 \cdot 49,13 - 0,3576 \cdot 49,13}{0,5362 \cdot 49,13} \cdot 100 = \\ &= \frac{26,344 - 17,569}{26,344} \cdot 100 = 33,3 \%. \end{aligned}$$

При работе на метане экономия составит

$$\begin{aligned} \tilde{W} &= \frac{0,5362 \cdot 43,29 - 0,2295 \cdot 43,29}{0,5362 \cdot 43,29} \cdot 100 = \\ &= \frac{23,212 - 9,935}{23,212} \cdot 100 = 57,2 \%. \end{aligned}$$

Почти такой же результат зафиксирован и на практике. Еженедельник «Europa-Express» пишет: «...Водители смогут убедиться воочию: автомобиль, который на природном газе, выгоден. Его заправка обходится в два раза дешевле, чем, например, заправка машины с бензиновым двигателем» [8].

В табл. 2 приведены экологические показатели рассматриваемых двигателей с выхлопом в атмосферу. Коэффициент экологической чистоты двигателя η_0 можно выразить произведением коэффициента химической чистоты η_{ch} , коэффициента акустической чистоты $\eta_{ак}$, и коэффициента термической чистоты η_{th} , т.е.

$$\eta_0 = \eta_{ch} \cdot \eta_{ак} \cdot \eta_{th}. \quad (5)$$

Прототип выбрасывает в атмосферу за час работы на номинальном режиме до 45,28 кг «парникового» газа ($G_{CO_2} = 45,28$ кг/час) плюс токсические

вещества. При работе на пропане – $G_{CO_2} = 41,97$ кг/час, на метане – 32,96 кг/час. Хотя газовые варианты прототипа выбрасывают в атмосферу CO_2 меньше, а «содержание токсичных компонентов в выхлопном газе двигателей внутреннего сгорания, работающих на сжатом газе, в два, а то и в три раза меньше, чем в тех, которые используют иные виды моторного топлива» [8], все же для прототипа и его вариантов на газе η_{ch} нужно принять равным нулю.

Фирма Volkswagen плотно «упаковывает» свой двигатель в звукоизолирующую оболочку. Поэтому значение $\eta_{ак}$ примем равным 1,0 ($\eta_{ак} = 1,0$).

Таблица 2. Показатели двигателя-прототипа на бензине и его вариантов на газе

Название параметра	Топливо Параметр	В	C ₃ H ₈	CH ₄
Степень сжатия	ε	8,3	8,5	8,5
Температура в конце сжатия	T_c , К	683	701	755
Подведенная теплота	Q_{1A} , кВт	177,17	180,54	166,92
Индикаторная мощность	N_i , кВт	68,95	70,1	64,0
Индикаторный КПД	η_i	0,389	0,388	0,383
Среднее индикаторное давление	p_i , кПа	965,1	980,9	899,2
Эффективная мощность	N_e , кВт	48,0	49,13	43,29
Эффективный КПД	η_e	0,2709	0,2721	0,2594
Среднее эффективное давление	p_e , кПа	671,9	687,7	606,0
Часовой расход топлива	$B_{ч}$, кг/час	14,53	13,99	11,98
Стоимость часового расхода топлива	$W_{ч}$, €/час	25,74	17,57	9,935
Удельный эффективный расход топлива	g_e , г/(кВт·ч)	302,7	284,8	276,8
Цена 1 кВт·ч выработанной энергии	P_r , ц/(кВт·ч)	53,62	35,76	22,95
Экономия в стоимости топлива	S , €/час	–	8,775	13,28
% снижения стоимости топлива	$\tilde{S}$, %	–	33,3	57,2
% снижения стоимости 1 кВт·ч	ΔP_r , %	–	33,3	57,2
Выброс CO ₂ в атмосферу	G_{CO_2} , кг/час	45,28	41,97	32,96
Коэффициент химической чистоты	η_{ch}	0	0	0
Коэффициент акустической чистоты	$\eta_{ак}$	1	1	1
Выброс эксергии в атмосферу	$E_{ав}$, кВт	54,61	54,51	50,66
Эксергия топлива	E_c , кВт	182,98	189,8	172,75
Коэффициент термической чистоты	η_{th}	0,7	0,7128	0,7068
Коэффициент экологической чистоты	η_0	0	0	0

С выхлопными газами, от масла и воды прототип выбрасывает в атмосферу более 70 % теплоты топлива. Объективности ради нужно принять, что атмосферу термически загрязняет только эксергия выхлопных газов $E_{ав}$. Обозначим эксергию топлива

E_c . Тогда прототип имеет коэффициент термической чистоты (табл. 1)

$$\eta_{th} = \frac{E_c - E_{ав}}{E_c} = 0,7. \quad (6)$$

На том же уровне значения η_{th} имеют и газовые варианты прототипа.

С учетом сказанного выше получим «нулевую» экологическую чистоту прототипа и его газовых вариантов (5).

В табл. 3 приведены значения параметров рабочего тела в потоках химически чистых двигателей (рис.1а) при работе на различных топливах и значениях мольной доли кислорода в окислителях, равных 0,3 и 0,5. В табл. 4 приведены значения коэффициентов наполнения η_v химически чистых двигателей без наддува, принятых значений степени сжатия (ограниченных значениями температуры T_c), а также зна-

чения $\eta_i = p_i/p_Q$ и $\eta_e = p_e/p_Q$, где p_Q – среднее тепловое давление [9].

Хотя в химически чистых двигателях можно принять повышенные значения ε , эффективность преобразования в цилиндре двигателя теплоты топлива в работу (η_i) понизилась в связи с наличием транзитной составляющей в рабочем теле M''_{CO_2} и увеличением Q_{1A} . Так, при повышении доли кислорода в окислителе (O_{24}) до 0,5 количество Q_{1A} возросло в 2,435 раза по сравнению с прототипом (оба двигателя на бензине). Эффективный КПД при этом вырос в 1,5 раза, p_i – в 2,175 раза, p_e – в 3,68 раза.

Таблица 3. Параметры потоков в химически чистых двигателях

Топливо	O_{24}	Параметр	1	2	4	9	11	17	19	23	24	28
Бензин	0,3	T, K	309,0	1539,8	535,4	313,0	293,0	313,0	520,4	1519,8	1055,3	535,4
		$M, \text{кмоль/с}$	0,002208	0,0023283	0,0023283	0,000424	0,0000525	0,000449	0,0043424	0,003696	0,003696	0,0006466
		$H, \text{кВт}$	29,89	172,63	53,46	5,666	3,985	1,354	65,10	174,30	117,0	9,986
	0,5	T, K	306,0	2165,6	535,4	313,0	293,0	313,0	520,4	2145,6	1525,5	535,4
		$M, \text{кмоль/с}$	0,002217	0,0024996	0,0024996	0,0006965	0,0000862	0,0007375	0,00493	0,003865	0,003865	0,0010654
		$H, \text{кВт}$	30,24	266,1	54,717	9,307	6,545	2,223	73,91	268,83	183,02	16,452
C_3H_8	0,3	T, K	310,2	1554,8	535,4	313,0	293,0	313,0	520,4	1534,8	1066,6	535,4
		$M, \text{кмоль/с}$	0,0022585	0,0023863	0,0023863	0,0003835	0,0001258	0,0005113	0,004327	0,003688	0,003688	0,0006392
		$H, \text{кВт}$	27,58	174,09	53,276	5,125	1,973	1,532	64,87	175,83	118,06	9,87
	0,5	T, K	309,0	2179,5	535,4	313,0	293,0	313,0	520,4	2159,5	1536,1	535,4
		$M, \text{кмоль/с}$	0,002266	0,002472	0,002472	0,0006179	0,0002059	0,0008239	0,004823	0,003793	0,003793	0,00103
		$H, \text{кВт}$	26,134	263,0	53,61	8,2569	3,23	2,483	72,31	265,79	181,0	15,905
CH_4	0,3	T, K	310,5	1524,6	535,4	313,0	293,0	313,0	520,4	1504,6	1043,9	535,4
		$M, \text{кмоль/с}$	0,0022585	0,0022585	0,0022585	0,0002946	0,0002946	0,000589	0,000404	0,00345	0,00345	0,000589
		$H, \text{кВт}$	26,04	159,33	49,86	3,9365	2,4404	1,7758	60,568	150,54	107,96	9,095
	0,5	T, K	309,0	2117,0	535,4	313,0	293,0	313,0	520,4	2097	1488,5	535,4
		$M, \text{кмоль/с}$	0,002266	0,002266	0,002266	0,0004532	0,0004532	0,0009064	0,004326	0,00342	0,00342	0,0009064
		$H, \text{кВт}$	23,91	229,18	48,33	6,056	3,7543	2,732	64,86	231,73	157,6	13,997

Чтобы полнее понять результаты внутреннего форсирования химически чистых двигателей без наддува, рассмотрим их балансы мощности (табл. 5)

$$N_e = N_{em} + N_{кт} = (N_i + N_f - N_r) + (N_{T1J} + N_{C1J} - N_{mm}); \quad (7)$$

$$\eta_e = \eta_{em} + \Delta\eta_{кт} = (\eta_i + \Delta_f - \Delta_r) +$$

$$+ (\Delta_{T1} + \Delta_{C1} - \Delta_{mm}), \quad (8)$$

где N_{em} , N_f , N_r – соответственно эффективная

мощность поршневого мотора, мощность его насосных ходов и механические потери.

Таблица 4. Условия и результаты внутреннего форсирования химически чистых двигателей без наддува при различных топливах

Параметр	Прототип	$O_{24} = 0,3$				$O_{24} = 0,5$			
		В	C_3H_8	CH_4	$\tilde{x}$	В	C_3H_8	CH_4	$\tilde{x}$
η_v	0,716	0,743	0,760	0,760	–	0,750	0,760	0,760	–
ε	8,3	16,0	17,0	17,0	–	18,0	18,0	19,0	–
T_c , К	683	590	655	709	–	592	663	756	–
p_Q , кПа	2481	3680	3658	3309	1,483	6042	5893	5090,9	2,435
p_i , кПа	965,1	1300,3	1228	1102,0	1,347	2099	1953	1680	2,175
η_i	0,389	0,353	0,336	0,333	0,907	0,348	0,331	0,330	0,895
p_e , кПа	672,0	1354,4	1290	1149,0	2,015	2474	2324	1957	3,682
η_e	0,271	0,368	0,353	0,347	1,358	0,409	0,394	0,385	1,509
T_{max} , К	2800	2636	2647	2605	0,941	3579	3572	3500	1,278
p_{max} , атм	55,9	110,0	113,4	105,9	1,968	178,7	177,8	159,7	3,197

Таблица 5. Баланс мощностей по силовым установкам (кВт, %)

Статьи	$O_{24} = 0,3$			$O_{24} = 0,5$		
	В	C_3H_8	CH_4	В	C_3H_8	CH_4
Q_{1A}	262,86	261,3	236,35	431,66	421,0	363,6
N_e	96,76	92,17	82,07	176,77	166,0	139,85
N_{em}	71,95	66,8	57,81	129,06	118,58	99,08
$N_{кт}$	24,81	25,37	24,26	47,709	47,47	40,77
N_i	92,90	87,75	78,76	150,01	139,53	120,0
N_f	–1,701	–1,701	–1,701	–1,701	–1,701	–1,701
N_r	19,249	19,249	19,249	19,249	19,249	19,249
N_{T1J}	57,29	57,77	56,58	85,81	84,784	74,127
N_{C1J}	29,09	28,98	28,98	33,03	32,306	28,98
N_{mm}	3,386	3,414	3,344	5,07	5,011	4,381
η_e	36,81	35,27	34,72	40,95	39,44	38,46
η_{em}	27,37	25,56	24,46	29,9	28,17	27,25
$\Delta\eta_{кт}$	9,44	9,709	10,26	11,05	11,276	11,21
η_i	35,34	33,58	33,32	34,75	33,14	33,01
Δ_f	–0,647	–0,65	–0,72	–0,394	–0,404	–0,468
Δ_r	7,32	7,367	8,144	4,459	4,572	5,294
Δ_{T1}	21,79	22,107	23,94	19,88	20,12	20,39
Δ_{C1}	11,07	11,09	12,26	7,65	7,67	7,97
Δ_{mm}	1,288	1,307	1,415	1,175	1,19	1,205

Следует отметить следующее: первое – прототип и его газовые варианты с выхлопом в атмосферу не имеют в рассматриваемом случае $N_{кт}$ и $\Delta\eta_{кт}$. Второе – химически чистых двигателях указанные добавки значительны: при $O_{24} = 0,3$ они составляют при работе на бензине 9,44 % от Q_{1A} , при работе на

пропане – 9,71 %, на метане – 10,26 %. При $O_{24} = 0,5$ и работе на бензине – 11,05 % от тоже возросшего потока Q_{1A} , при работе на C_3H_8 – 11,28 %, на CH_4 – 11,21 %. В химически чистых двигателях мощность газовой турбины N_{T1J} становится сравнимой с N_{em} .

Правда, при повышении O_{24} растут максималь-

ные давления цикла $p_{\max}$ и температуры $T_{\max}$ (табл. 3). Это может ограничить допустимое значение O_{24} или ε .

В соответствии с данными табл. 6 в химически чистом двигателе, работающем на бензине, удельный эффективный расход топлива уменьшился по сравнению с прототипом на 80 г/(кВт·ч) при $O_{24} = 0,3$ и на 102,45 г/(кВт·ч) при $O_{24} = 0,5$. Стоимость 1 кВт·ч выработанной энергии соответственно понизилась на $\Delta P_r = 26,4$ % при $O_{24} = 0,3$ и на $\Delta P_r = 33,85$ % при $O_{24} = 0,5$. Экономия на стоимости топлива составила $S = 13,7$ €/час при $O_{24} = 0,3$ (стоимость использованного топлива $W = 38,185$ €/час) и $S = 32,08$ €/час при $O_{24} = 0,5$ (стоимость израсходованного топлива $W = 62,707$ €/час). При переходе с бензина на C_3H_8 в химически чистом двигателе по сравнению с прототипом снижение стоимости 1 кВт·ч составило $\Delta P_r = 48,56$ % при $O_{24} = 0,3$, а при $O_{24} = 0,5$ – $\Delta P_r = 54$ %.

Экономия на стоимости топлива составляет $S =$

24 €/час при $O_{24} = 0,3$ и $S = 48,06$ €/час при $O_{24} = 0,5$.

По сравнению с прототипом на бензине в химически чистом двигателе на метане стоимость 1 кВт·ч понизилась на 68,03 % при $O_{24} = 0,3$ и на 71,15 % при $O_{24} = 0,5$. Экономия на стоимости топлива составляет $S = 29,94$ €/час при $O_{24} = 0,3$ и $S = 53,35$ €/час при $O_{24} = 0,5$.

Таким образом, в химически чистых автомобильных двигателях по предлагаемой схеме (рис. 1а) идет дальнейшее существенное улучшение их технико-экономических показателей по сравнению с прототипом на бензине и при работе на бензине, и при работе на пропане и метане.

А как изменились экологические показатели?

Выработка «парникового» газа G_{CO_2} с ростом O_{24} в химически чистых двигателях возрастает по сравнению с прототипом (табл. 6). Но это уже не имеет значения, так как выброса CO_2 в атмосферу не происходит

Таблица 6. Экономичность и экологическая чистота

Параметры	$O_{24} = 0,3$			$O_{24} = 0,5$		
	В	C_3H_8	CH_4	В	C_3H_8	CH_4
Экономичность						
M_B , кмоль/с	0,000052524	0,00012784	0,00029459	0,000086254	0,00020597	0,0004532
$B_{\text{ч}}$, кг/час	21,556	20,250	16,968	35,399	32,626	26,104
V_r , л/час	30,794	39,784	—	50,57	64,098	—
W_r , €/час	38,185	25,422	14,066	62,707	40,956	21,64
N_e , кВт	96,76	92,17	82,07	176,77	166,0	139,85
g_e , г/(кВт·ч)	222,78	219,7	206,75	200,25	196,54	186,66
P_r , ц/(кВт·ч)	39,46	27,58	17,14	35,47	24,67	15,47
Δg_e , г/(кВт·ч)	79,92	83,0	95,95	102,45	106,16	116,04
ΔP_r , %	26,4	48,56	68,03	33,85	53,99	71,15
S , €/час	13,7	24,0	29,94	32,08	48,06	53,35
Экологическая чистота						
G_{CO_2} , кг/час	67,18	60,75	46,66	110,33	97,9	71,79
η_{ch}	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
$\eta_{ак}$	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
$E_{аб}$, кВт	44,3	45,16	43,247	93,1	92,5	78,875
E_c , кВт	275,5	274,7	244,6	452,4	442,6	376,29
η_{th}	0,839	0,836	0,823	0,794	0,791	0,790
η_0	0,839	0,836	0,823	0,794	0,791	0,790

Известно, что кроме CO_2 с выхлопными газами в атмосферу выбрасываются и вредные для человека (токсичные) вещества: оксиды азота (NO_x), сажа, оксиды углерода (CO), углеводороды (CH), альдегиды, канцерогенные вещества и др. [10]. В химически чистых двигателях по предлагаемой схеме NO_x будет отсутствовать, а сажа, CO и CH будут догорать в последующих циклах. Что касается других токсичных веществ, то потребуются их нейтрализация разработанными промышленностью методами. Это позволяет принять $\eta_{ch} = 1,0$. По указанной выше причине $\eta_{ак} = 1,0$. Теперь в окружающую среду рабочее тело выбрасывается при температуре T_{24} (табл. 3), которая существенно ниже T_2 . При этом η_{th} возрастает до значения $\eta_{th} = 0,79 \div 0,84$, а вместе с ним возрастает и η_0 от нуля до значения η_{th} .

Некоторые водители украшают с гордостью свой автомобиль надписью: «Я заправляюсь природным газом!» [8]. С учетом сказанного выше мы надеемся, что на этих автомобилях скоро появится и другая надпись: «Мой авто – экологически чистый!»

Выводы

1. Показано, что в выпускаемых промышленностью автомобильных двигателях без наддува и с выхлопом в атмосферу при их переводе с бензина на пропан стоимость 1 кВт·ч вырабатываемой энергии уменьшается на 33,3 %, а при переводе с бензина на метан – на 57,2 %. Все эти двигатели имеют «нулевую» экологическую чистоту.

2. Автомобильные двигатели с мембранным реактором при работе на углеводородных топливах имеют полную химическую чистоту, а термическая их чистота повышается до 80 %, обеспечивая 80-ти процентную экологическую чистоту.

3. Только в этих химически чистых автомобильных двигателях, не применяя наддува, можно повысить по сравнению с прототипом на бензине среднее индикаторное давление в 2 раза, среднее эффективное давление в 2,5÷3 раза, эффективный КПД – в 1,5 раза.

4. По сравнению с прототипом на бензине в химически чистом автомобильном двигателе без наддува тоже работающем на бензине стоимость 1 кВт·ч вырабатываемой энергии уменьшается на 26,4÷34,0 %, при работе на пропане – на 48,5÷54,0 %, при работе на метане – на 68,0÷71,0 %.

Таким образом, максимально выиграют экология и владельцы автомашин, если автомобильные двигатели последних не только будут переведены с бензина на метан, но будут также дооснащены мембранными реакторами, позволяющими работать двигателю с мольной долей кислорода в окислителе, равной 0,3÷0,4.

Список литературы

1. Jantovski E., Shokotov M. ZEMPES (Zero Emission Piston Engine System), 2nd Annal Conf. on Carbon Dioxide Sequestration, May 5–8, 2003, Alexandria VA USA.
2. Jantovski E., Shokotov M., Mc Govern I., Vaddella V. Zero Emission Piston Engine System for a Bus. Proc. Int. Conf. VAESEP, Dublin, 2004.
3. Jantovski E., Shokotov M., Mc Govern I., Foy K. Elaboration of Zero Emission Membrane Piston Engine System (ZEMPES) for propane fuelling 4th Carbon Sequestration Conference, Paper 109, Alexandria, VA USA, 2005.
4. Shokotov M., Jantovski E., Shokotov V. Exergi Conversion in the Thermochemical Recuperator of Piston Engine Proc. Int. Conf. ECOS 2005, Trondheim, Norway, 2005.
5. Итоги науки и техники. Двигатели внутреннего сгорания. Том 4. ВИНТИ, Мю, 1985, 282 с.
6. Armstrong P., Sorensen I., Foster T. ITM Oxygen: An Enabler for IGCC. Progress report. Gasification technologies 2003, 12–15 Oct. 2003.
7. Selimovic F., 2005, "Modeling of Transport Phenomena in Monolithic Structures related to CO_2 -free power process", Lund Uni. of Technology, Sweden, 03.07.2005.
8. Скворчевская А., Не бензином единым ..., Europe-Express, № 5, 30.01 – 15.02.2006.
9. Процессы в перспективных дизелях (Под ред. А.Ф. Шеховцова). Харьков: «Основа». 1992, 352 с.