

## АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

### Комплексная оценка эффективности использования альтернативных видов топлива в дизелях по энергоэкологическому критерию

Ведрученко В. Р., доктор техн. наук, Крайнов В. В., канд. техн. наук  
Омский государственный университет путей сообщения

Рассмотрены и проанализированы основные виды альтернативных топлив для дизельных энергетических установок. Сопоставлены физико-химические, моторные, энергетические, эксплуатационные и экологические показатели альтернативных топлив и стандартного дизельного топлива по ГОСТ 305–82. Предложена комплексная методика оценки энергетических и экологических показателей альтернативных топлив для дизелей, позволяющая как на стадии проектирования мероприятий по переводу на эти топлива дизельных энергетических установок, так и на стадии их эксплуатации оценить эффективность такого перевода.

**Ключевые слова:** топливо, энергоемкость, энергоплотность, энергетическая эффективность, экологичность, теплота сгорания, критерий оценки.

Анализ многочисленных исследований [1–9] показывает, что возможны различные подходы к классификации топлив по разным критериям (роду топлива, агрегатному состоянию, методам получения и использования, отраслевому назначению и др.). Применительно к альтернативным топливам, очевидно, важнейшей является их классификация по массовым и объемным энергетическим показателям. Такие топлива обычно подразделяют на три группы: высокой, средней (на уровне современных нефтяных дизельных топлив для двигателей) и низкой энергоемкости (МДж/кг) и энергоплотности (МДж/м<sup>3</sup>).

По массовой энергоемкости в первую группу входят водород и его добавки к традиционным моторным топливам, а также смеси с высокоэнергетическими компонентами, во вторую — углеводородные газы и смеси на основе нефтяных топлив. Среднюю энергоплотность имеют сжиженные газы и смеси современных моторных топлив. Группу топлив с низкими энергетическими показателями составляют в основном вторичные ресурсы, спирты, аммиак и гидридные энергоносители с невысокой теплотой сгорания. Низкокипящие углеводородные газы и водород имеют высокую энергоемкость, но низкие объемные энергетические показатели из-за малой плотности. В табл. 1 и 2 приведены основные обобщенные физико-химические и эксплуатационные свойства ряда альтернативных топлив для возможного их использования в энергетических установках, в том числе в поршневых ДВС.

Основным показателем, характеризующим эффективность топлива с энергетической точ-

ки зрения, является удельное тепловыделение, т. е. количество теплоты, которое выделяется при сгорании единицы массы или объема топлива. Для оценки энергетических свойств моторных топлив наиболее широко используется их теплота сгорания  $H_{и}$ , представляющая собой количество теплоты, выделяющейся при полном сгорании топлива в кислороде при стехиометрическом соотношении. Однако величина  $H_{и}$  служит характеристикой энергоемкости топлива и не отражает влияния состава горючей смеси, что особенно важно при сжигании топлив различной природы. Более объективный энергетический параметр — удельная теплота сгорания смеси (топливо + окислитель), известная как теплопроизводительность топливной смеси  $H_{см}$ . Она может быть рассчитана по теплоте сгорания с учетом стехиометрического коэффициента и коэффициента избытка окислителя. Высшая и низшая теплота сгорания, кДж/кг, обычно определяется экспериментально при сжигании в калориметрической бомбе (ГОСТ 21261–75) или расчетным путем по полуэмпирическим формулам (например, по формулам Менделеева) [6]:

$$Q_B = [81C + 300H - 26(O - S)] \cdot 4,1868; \quad (1)$$

$$Q_H = H_{и} = [81C + 246H - 26(O - S) - 6W] \cdot 4,1868, \quad (2)$$

где  $C$ ,  $H$ ,  $O$ ,  $S$ ,  $W$  — содержание соответственно углерода, водорода, кислорода, серы, воды, % (по массе).

Формула (2) для массовых долей  $C$ ,  $H$ ,  $O$ ,  $S$ ,  $W$  принимает вид:

Таблица 1

Параметр	Значения физико-химических параметров современных перспективных топлив [5]									
	Бензин	Природный газ	Сжиженный газ	Водород (жидкий)	Метанол	Этанол	Аммиак (жидкий)	Гидрид $Mg_2NiH_x$		
Плотность при 15 °С, г/см	0,7 – 0,8	$0,68 \cdot 10^{-3}$	0,532	0,07	0,79	0,79	0,71	1,76		
Температура кипения, °С	35 – 195	– 162	– 42	– 252,8	64,7	78,37	– 33,3	–		
Температура застывания, °С	– (60 – 80)	– 182	– 187	– 259,1	– 97,8	– 114,6	– 77,7	–		
Теплота испарения, ккал/кг	69 – 73	–	92,8	107	263	214	327	–		
Энергоемкость с учетом диссоциации, ккал/кг	10 118	11 703	10 900	28 160	4708	5962	4087	2030		
Энергоплотность с учетом диссоциации, ккал/л	8410	8,192	5800	1998,5	3743	4769,6	2779,2	3440		
Энергоэквивалент 76 л бензина	76	415*	100	275	147	110	164	132		
В том числе:										
объем топлива, л	53,1	37,2*	51,1	19,5	117	88	127	233		
масса топлива, кг	68	500	85	136	141	107	152	284		
ПДК паров, мг/мг <sup>3</sup>	100	–	800	–	5,0	1000	20	–		
Условия хранения	Нормальные	Нормальные	1,4 МПа/38 °С	253 °С	Нормальные	Нормальные	1,4 МПа/38 °С	Нормальные		
КПД получения топлива	0,83**	1,0	0,5***	0,5****	0,66***	0,75****	0,4*****	0,5*****		
КПД использования топлива, %	9,4	9,9	10,7	10,2	12,1	10,3	9,4	14,4		
Общий КПД топлива, %	7,8	9,9	5,4	5,1	8,0	7,7	3,8	7,2		

\* В сжатом виде.

\*\* Получение из нефти прямой перегонкой.

\*\*\* Получение конверсией угля в жидкое топливо и газ.

\*\*\*\* Получение конверсией угля в синтез-газ.

\*\*\*\*\* Оценка по теплоте образования и КПД получения водорода.

Таблица 2

Параметр	Сравнительные значения теплотехнических и моторных параметров используемых и альтернативных видов топлива для дизелей [6]									
	Дизельное топливо (ГОСТ 305–82)		Природный газ (метан $\text{CH}_4$ )	Сжиженный нефтяной газ (СНГ)		Низшие спирты		Диметилэфир (ДМЭ) $\text{CH}_3\text{OCH}_3$	Эфиры рапсового масла (РМЕ)	Водород $\text{H}_2$
	Летнее (Л)	Зимнее (З)		Пропан $\text{C}_3\text{H}_8$	Бутан $\text{C}_4\text{H}_{10}$	Метанол $\text{CH}_3\text{OH}$	Этанол $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$			
			0,865					0,855	0,75	0,818
Массовые доли элементов:										
углерода $g_C$	0,120	0,130	0,25	0,182	0,172	0,125	0,13	0,12	–	–
водорода $g_H$	0,005	0,005	–	–	–	0,5	0,348	0,11	1	1
кислорода $g_O$	0,01	0,01	–	–	–	–	–	–	–	–
серы $g_S$	230	235	16	44	58	32	46	294	2	2
Молярная масса $\mu$ , кг/кмоль	836	820	0,66	502	578	791	810	882	0,082	0,082
Плотность $\rho$ при 20 °С, кг/м <sup>3</sup> (г/м <sup>3</sup> )	180 – 360	180 – 340	– 161,58	– 42	– 0,6	65	78	250 – 350	– 252,8	– 252,8
Нормальная температура кипения (пределы разгонки), °С										
Теплота парообразования при $p = 0,1$ МПа, кДж/кг	220 – 240	220 – 240	511 ( $t = -161,58$ °С)	420	390	1160	910	–	–	–
Низшая теплота сгорания $Q_H$ , МДж/кг	42,8	43,03	50	46,35	45,75	19,6	26,9	37,5	120	120
Цетановое число (ЦЧ)	Не менее	45	–	–	12 (расчет)	5 (расчет)	8 (расчет)	52 – 56	–	–
$l_0$ , кг воздуха/кг топлива	14,41	14,51	17,24	15,68	15,45	6,465	8,98	12,51	34,48	34,48
$L_0$ , кмоль воздуха/кг топлива	0,498	0,500	0,658	0,564	0,550	0,254	0,332	0,432	1,69	1,69
Теплота сгорания стехиометрической смеси $Q_H/l_0$ , МДж/кг	2,97	2,9	2,90	2,956	2,96	3,03	2,995	2,998	3,482	3,482
Температура самовоспламенения (при $p = 1$ бар), °С	250	650	504	430	450	420	235	–	–	–

$$H_{\text{и}} = 33\,913C + 102\,996H - 10\,886O + 10\,886S - 2512W. \quad (3)$$

Возможно применение уточненной формулы Д. П. Коновалова:

$$Q_{\text{н}} = H_{\text{и}} = [81,4C + 244,2H - 30,5O] \cdot 4,1868. \quad (4)$$

Таким образом, теплота сгорания нефтяных топлив определяется процентным содержанием углерода С и водорода Н. Бензины и керосины, имеющие большее содержание Н и меньшее содержание С и О по сравнению с дизельными топливами, отличаются более высокой удельной теплотой сгорания [6].

Количество теплоты, выделяющейся при сгорании топлива, определяется не столько теплотой сгорания самого топлива, сколько теплотой сгорания смеси топлива с воздухом. При сгорании жидкого топлива в распыленном виде при теоретически необходимом количестве воздуха  $l_0$  теплота сгорания смеси определяется из выражения  $H_{\text{и.см}} = H_{\text{и}}/l_0$ . Значения низшей теплоты сгорания некоторых топлив, применяемых в многотопливных дизелях, и их стехиометрических смесей с воздухом приведены в табл. 2. Теплота сгорания рабочей смеси любого состава вычисляется по формуле [3]

$$Q_{\text{см}} = H_{\text{и}}/(1 + \alpha l_0), \quad (5)$$

где  $\alpha$  — коэффициент избытка воздуха.

Количество воздуха, необходимое для сгорания топлива, кмоль/кг, определяется из выражения [3]

$$L_0 = \left( \frac{1}{0,21} \right) \left( \frac{C}{12} + \frac{H}{4} - \frac{O}{32} \right) \quad (6)$$

или

$$l_0 = L_0 \mu_{\text{в}}, \text{ кг / кг}, \quad (7)$$

где  $\mu_{\text{в}} = 28,93$  — молекулярная масса воздуха.

Количество подаваемого в камеру сгорания многотопливного дизеля топлива зависит не только от положения дозирующего органа топливоподающей аппаратуры и режима ее работы, но и от физических свойств применяемого топлива. К физическим свойствам топлив, значения которых учитываются при расчете и конструировании топливоподающей аппаратуры многотопливных дизелей, относятся плотность, вязкость и сжимаемость топлив.

В процессе топливоподачи топливо протекает через элементы топливоподающей системы, где подвергается воздействию высоких

переменных давлений и температур. При этом указанные физические свойства не остаются постоянными. Поэтому при расчете процесса впрыскивания по методикам, разработанным рядом исследователей, обычно используют зависимости вязкости топлива от давления и температуры. Вместе с тем в связи с тенденцией значительного изменения номенклатуры и сортов нефтяных топлив, увеличением видов альтернативных топлив, ростом давлений впрыскивания возникает необходимость уточнения зависимостей физических свойств топлив от давления и температуры [3, 4]. Однако при этом не учитываются условия в камере сгорания, в частности степень диссоциации, определяемая родом топлива, что ведет к завышению значений  $H_{\text{и}}$  и  $H_{\text{см}}$ . Как известно из термодинамики, между полной энтальпией топливной смеси и ее теплопроизводительностью существует однозначная связь: теплопроизводительность  $H_{\text{см}}$  равна разности значений энтальпий топливной смеси и продуктов сгорания или, другими словами, разности их стандартных энтальпий [5]:

$$H_{\text{см}} = I_{\text{т}} - I_{\text{п.с}}. \quad (8)$$

После подстановки формул энтальпий компонентов получим уравнение для расчета весовой теплопроизводительности

$$H_{\text{см}} = \frac{I_{\text{т}} + \alpha L_0' I_{\text{м.ок}}}{L_{\text{т}} + \alpha L_0' I_{\text{м.ок}}} - \sum_{m=1}^n g_m I_m, \quad (9)$$

где  $I_{\text{т}}$  и  $I_{\text{п.с}}$  — энтальпии топливной смеси и продуктов сгорания при температуре приведения  $T = 298,15$  К;  $I_{\text{т}}$  и  $I_{\text{м.ок}}$  — полная энтальпия 1 моля топлива и окислителя;  $L_0'$  — мольный стехиометрический коэффициент;  $g_m$  и  $I_m$  — весовая доля  $m$ -го компонента в продуктах сгорания и его энтальпия.

Наиболее высокими энергомассовыми показателями характеризуется водород: его теплота сгорания почти втрое выше, чем бензина. За водородом в порядке убывания значения  $H_{\text{и}}$  следуют этанол, метанол и аммиак, причем теплота сгорания последнего почти в 7 раз ниже по сравнению с водородом. Массовые теплопроизводительности при этом отличаются меньше — всего на 30%. Иная картина наблюдается при сравнении объемных энергетических характеристик. Наиболее высокая энергоплотность — у жидких топлив.

Общей закономерностью для всех топлив, приведенных в табл. 1, 2, является характер зависимости объемной теплопроизводитель-

Таблица 3

Свойства топлива	Топливо						
	ДТ	КПГ	СНГ	ДМЭ	Мета-нол	РМ	МЭ РМ
	Эксплуатационные характеристики						
Возобновляемость ресурсов	–	–	–	–	–	+	+
Экологичность при производстве	–	+	+	–	–	+	+/-
Экологичность при сгорании	+/-	+	+	+	+	+	+
Адаптированность к транспортировке и хранению	+	–	–	–	+	+	+
Адаптированность АЗС	+	–	–	–	+	+	+
Адаптированность дизеля	+	–	–	–	–	+/-	+
Парниковый эффект	–	–	–	–	–	+	+
Технико-экономические характеристики							
Цетановое число	+	–	–	++	–	0	+
Топливная экономичность и диапазон ее изменения	+	–	0	+	0	+	+
Эмиссия оксидов азота NO <sub>x</sub>	+	+	+	+	+	+	+
Эмиссия формальдегида НСНО	+	+	+	+	–	+	+
Некоррозионность	+	+	+	0	–	+	0
Доступность топлива	+	0	–	–	–	+	0
Затраты на обслуживание двигателя и транспортного средства	+	–	–	–	–	0	0

Примечание: “+” — преимущество; “–” — недостаток; “+/-” — сочетание преимуществ и недостатков; ДТ — дизельное топливо; КПГ — компримированный природный газ; СНГ — сжиженный нефтяной газ; ДМЭ — диметилловый эфир; РМ — рапсовое масло; МЭ РМ — метиловый эфир рапсового масла.

ности от состава топливо-воздушной смеси, которая имеет максимум в области стехиометрических соотношений [5, 6]. При обеднении смеси значения  $H_{см}$  сближаются и при  $\alpha = 5$  они отличаются лишь на 8 – 12 % [5]. Однако, как показывает практика, информации о приведенных в табл. 1 и 2 сравнительных физико-химических, моторных, эксплуатационных и экологических характеристиках дизельного топлива и ряда альтернативных топлив недостаточно для принятия решений об использовании их в дизелях [6, 9].

Такие данные не являются исчерпывающими и не позволяют сделать окончательный вывод о безусловной целесообразности первоочередного применения одного из рассматриваемых топлив, поскольку не учитывается экологичность. Для более обоснованного выбора необходимо провести дополнительное сравнение ряда других показателей (табл. 3), что обеспечит возможность более полной оценки преимуществ использования того или иного вида топлива [6].

Ввиду отсутствия стандартной методики в части определения эффективности примене-

ния альтернативного топлива (например, сжиженного нефтяного газа) как для экономии дизельного топлива, так и для одновременного снижения ущерба, причиняемого загрязнением окружающей среды в районе эксплуатации дизелей, комплексную (обобщенную) оценку энергоэкологических показателей работы дизеля, мы предлагаем проводить на основе анализа системы “дизель — альтернативное топливо (смесь) — окружающая среда”. Тогда без учета изменения экологических показателей, но с учетом причинно-следственных связей в качестве критерия может быть принят (на основе теоремы умножения вероятностей) энергетический показатель дизельного двигателя [4]:

$$K_{\Sigma}^{\Delta} = \eta_{п.т} \eta_e^{CM}, \quad (10)$$

где  $\eta_{п.т}$  — КПД производства, например, СНГ либо другого автомобильного топлива (АВТ);  $\eta_e^{CM}$  — эффективный КПД дизеля при работе, например, на СНГ или на его смесях с дизельным топливом и присадками.

Значение  $\eta_{п.т}$  можно определить на основе общей структурной зависимости, предложенной фирмой “Дженерал моторс” для оценки КПД производства смесового топлива [4]:

$$\eta_{п.т} = \frac{Q_B^п}{Q_B^н + Q_{сж}^п + Q_{сж}^{экс}}, \quad (11)$$

где  $Q_B^п$ ,  $Q_B^н$ ,  $Q_{сж}^п$ ,  $Q_{сж}^{экс}$  — соответственно высшая теплота сгорания полезной части топлива (СНГ) и исходного материала (подготовленной к перегонке нефти), энергия, эквивалентная затратам на производство СНГ и на эксплуатацию установки по производству смесового топлива.

Значения КПД получения (производства) некоторых АВТ приведены в табл. 1.

Эффективный КПД дизеля, работающего, например, на сжиженном нефтяном газе либо на его смеси с дизельным топливом, определяется по формуле [3]

$$\eta_e^{см} = \frac{3600 p_e}{g_i Q_n p_i}, \quad (12)$$

где  $g_i$ ,  $Q_n$ ,  $p_e$ ,  $p_i$  — соответственно индикаторный расход топлива дизелем, низшая теплота сгорания используемого топлива или смеси, среднее эффективное и индикаторное давления в цилиндре дизеля.

В общем виде комплексный энергоэкологический показатель предложен нами в [10]. На основе той же теоремы умножения вероятностей имеем:

$$K_{\Sigma}^{эо} = \eta_{п.т} \eta_e^{см} K_{Ti}. \quad (13)$$

Входящий в формулу (13) коэффициент снижения токсичности по  $i$ -му компоненту вредных выбросов дизеля ( $NO_x$ ,  $CO$ ,  $CH$ , сажа, альдегиды) определяется по формуле

$$K_{Ti} = 1 + \frac{C_{i1} - C_{i2}}{C_{i1}}, \quad (14)$$

где  $C_{i1}$ ,  $C_{i2}$  — концентрации  $i$ -го компонента при работе дизеля на СНГ или на его смеси с дизельным топливом и присадкой.

Обобщив формулы (10) – (14), можно получить окончательное выражение для оценки энергоэкологического критерия, %, работы дизеля на топливной смеси

$$K_{\Sigma}^{эо} = [(1-\xi)\eta_{п.т} + \xi\eta_e^{см}] \eta_e^{см} \left( 1 + \frac{C_{i1} - C_{i2}}{C_{i1}} \right) \cdot 100, \quad (15)$$

где  $\xi$  — массовая доля конденсата в продуктах сгорания топлива либо смеси.

В [9] приведены предпосылки для оценки ущерба от загрязнения атмосферы дизелем при работе на разных топливах.

Таким образом, при переводе энергетических установок (транспортных и стационарных) на альтернативные, смесевые и другие новые нетрадиционные топлива необходима комплексная оценка эффективности их работы, отражающая как экологические, так и экономические показатели. Таким комплексным показателем является предлагаемый нами критерий  $K_{\Sigma}^{эо}$ . Он инвариантен роду топлива, а эффективность сжигания нового топлива учитывает экологическую составляющую в виде соотношений компонентов вредных выбросов двигателя.

### Список литературы

1. **Большаков Г. Ф., Гулин Е. И., Торичев Н. Н.** Физико-химические основы применения моторных, реактивных и ракетных топлив. — Л.: Химия, 1965.
2. **Терентьев Г. А., Трюков В. М., Смаль Ф. В.** Моторные топлива из альтернативных сырьевых ресурсов. — М.: Химия, 1989.
3. **Теория двигателей внутреннего сгорания / Н. Х. Дьяченко, А. К. Костин, Б. П. Пугачев и др.** — Л.: Машиностроение, 1974.
4. **Скотт У. М.** Новые виды топлива для автомобильных дизелей. — В кн.: Перспективные автомобильные топлива / Пер. с англ. — М.: Транспорт, 1982.
5. **Смаль Ф. В., Арсенов Е. Е.** Перспективные топлива для автомобилей. — М.: Транспорт, 1979.
6. **Работа дизелей на нетрадиционных топливах / В. А. Марков, А. И. Гайворонский, Л. В. Грехов, Н. А. Ивашенко.** — М.: Легион-Автодата, 2008.
7. **Емельянов В. Е., Крылов И. Ф.** Альтернативные экологически чистые виды топлива для автомобилей. Свойства, разновидности, применение. — М.: АСТ, 2004.
8. **Деревянин С. Н., Марков В. А., Семенов В. Г.** Растительные масла и топлива на их основе для дизельных двигателей. — Харьков: Новое слово, 2007.
9. **Ведрученко В. Р., Малахов И. И.** Альтернативные виды топлива для судовых дизелей. — Омск: Омский институт водного транспорта (филиал) НГАВТ, 2012.
10. **Энергоэкологическая эффективность мероприятий по экономии топлива и тепловых ресурсов котельных установок / В. Р. Ведрученко, В. В. Крайнов, М. В. Кокшаров, А. В. Кириенков.** — В кн.: Вопросы теплоэнергетики и топливоиспользования: Межвуз. темат. сб. науч. тр. Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 1999.