

УДК 536.7

Носач В.Г.<sup>1</sup>,  
Шрайбер А.А.<sup>2</sup>, Родионов В.И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт технической теплофизики НАН Украины

<sup>2</sup>Институт общей энергетики НАН Украины

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БИОТОПЛИВА В ДВИГАТЕЛЯХ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ

Досліджено можливість застосування методу термохімічної регенерації для підвищення ефективності використання біопалива (етанолу) в двигунах внутрішнього згорання. Показано, що цей захід дозволяє економити до 21% палива.

Исследована возможность применения метода термохимической регенерации для повышения эффективности использования биотоплива (этанола) в двигателях внутреннего сгорания. Показано, что эта мера позволяет экономить до 21% топлива.

We study the possibility of using the method of thermochemical recuperation for the enhancement of the efficiency of biofuel (ethanol) utilization in reciprocating internal combustion engines. We show that this measure enables one to economize up to 21% of fuel.

$f_i, F$  – свободная энергия вещества  $i$  и газовой смеси;  
 $J$  – полная энтальпия;  
 $P$  – давление;  
 $q$  – теплотворная способность этанола;  
 $R$  – универсальная газовая постоянная;  
 $T$  – температура;

$x_i$  – количество молей вещества  $i$  в смеси;  
 $Z_i$  – стандартная свободная энергия вещества  $i$ ;  
 $\eta$  – КПД схемы;  
ДВС – двигатель внутреннего сгорания;  
ТХР – термохимическая регенерация.

За последнее столетие население Земли выросло почти вчетверо, а годовая добыча нефти – примерно в 20 раз. В настоящее время добыча углеводородов продолжает быстро расти, и по имеющимся оценкам за 40 – 50 лет их запасы будут практически исчерпаны. Выходом из этой ситуации является широкое освоение альтернативных источников энергии, в частности биотоплив для двигателей внутреннего сгорания (ДВС). В 2004 г. производство биотоплив в мире составляло всего 33 млрд. л (для сравнения – ежегодное мировое производство бензина порядка 1200 млрд. л). По производству и потреблению топливного этанола мировым лидером уже более 25 лет является Бразилия, где значительная часть транспорта работает на чистом этаноле либо смеси 25% этанола с 75% бензина. В последние годы производство этанола быстро растет в США, где в 20 штатах работает 81 этаноловый завод суммарной мощностью ~13 млрд. л,

а также в некоторых европейских странах (Испании, Франции и др.).

Использование биотоплив, в частности этанола, в Украине находится в зачаточном состоянии, несмотря на то, что условия для его производства (как особенности климата, так и мощный потенциал аграрного сектора экономики, включая наличие рабочей силы) весьма благоприятны. Поэтому можно рассчитывать на достаточно быстрый рост производства и потребления топливного этанола в Украине в ближайшие годы.

В Институте технической теплофизики НАН Украины был разработан новый метод повышения эффективности использования природного газа в ДВС путем его конверсии с продуктами сгорания (метод термохимической регенерации) [1, 2]. Этот метод позволяет не только существенно повысить КПД двигателя за счет преобразования физической теплоты уходящих газов в химическую энергию продуктов конверсии, но и

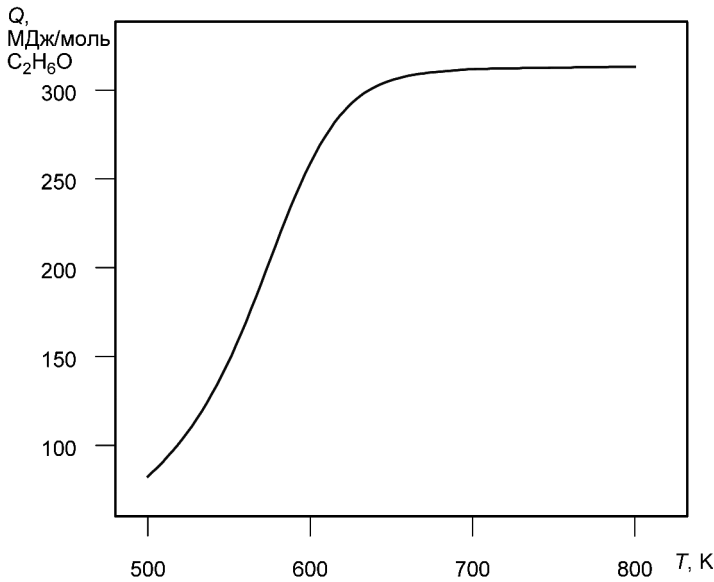
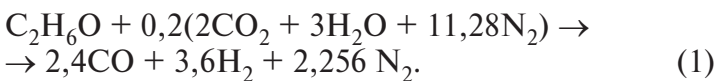


Рис. 1. Зависимость теплового эффекта реакции конверсии от температуры.

параллельно решить другую важную задачу снижения выбросов вредных веществ в атмосферу. В настоящей заметке обсуждается возможность применения термохимической регенерации (ТХР) для двигателей, работающих на этаноле.

Процесс стехиометрической полной конверсии этанола с продуктами сгорания происходит по реакции



Однако в действительности реакция конверсии идет не до конца в зависимости от условий (температуры и давления прежде всего). Поэтому для оценки эффективности ТХР для ДВС на этаноле необходимо определить состав продуктов конверсии. С этой целью, на основании предположения о том, что при достаточном времени реакции достигается равновесный состав продуктов, был разработан алгоритм его поиска. Использовался подход, предложенный в [3], в соответствии с которым равновесный состав газовой смеси соответствует минимуму суммарной свободной энергии Гиббса. Если количество молей в смеси есть  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ , свободная энергия смеси может быть представлена в виде

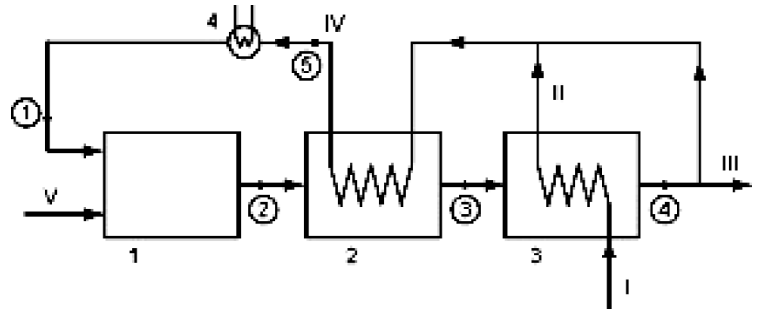


Рис. 2. Схема термохимической регенерации для ДВС на этаноле:  
 1 – ДВС; 2 – термохимический реактор;  
 3 – испаритель этанола; 4 – холодильник;  
 I – жидкий этанол; II – пар этанола; III – продукты сгорания; IV – продукты конверсии;  
 V – воздух. Цифры в кружках – номера точек для таблицы.

$$F(X) = \sum_{i=1}^n f_i(X); \quad f_i(X) = x_i [\mu_i + \ln(x_i/\bar{x})];$$

$$\mu_i = \frac{Z_i}{RT} + \ln P; \quad \bar{x} = \sum_i x_i. \quad (2)$$

Для поиска минимума функции  $F(X)$  использовался метод крутого спуска.

Некоторые результаты выполненных расчетов приведены на рис. 1 (здесь  $Q$  – тепловой эффект реакции конверсии, т.е. количество теплоты уходящих газов, преобразующейся в энергию конвертированного топлива). Видно, что достаточно полная конверсия этанола достигается при сравнительно невысоких температурах, что является важным достоинством этого топлива.

На рис. 2 представлена простейшая схема ТХР для ДВС на этаноле. Продукты сгорания из ДВС поступают в поверхностный теплообменник – термохимический реактор и далее в испаритель. Затем определенная часть продуктов сгорания смешивается с паром этанола и подается в реактор, где нагревается за счет физической теплоты выхлопных газов ДВС. Продукты конверсии из реактора поступают в охладитель и затем – в ДВС.

Были проведены термодинамические расчеты схемы, представленной на рис. 2. При этом для упрощения тепловые потери в реакторе и испарителе не учитывались, а температура продуктов сгорания за испарителем принималась равной

Таблица. Параметры рабочих тел

Номер точки на рис. 2	Параметры		Номер варианта		
			1	2	3
1	Количество веществ в конвертированном топливе, кмоль/кмоль $C_2H_6O$	$C_2H_6O$	0,324	0,084	0,016
		$N_2$	2,256	2,256	2,256
		$H_2$	2,613	3,344	3,551
		$CO_2$	0,309	0,078	0,014
		$CO$	1,443	2,155	2,354
	$H_2O$	0,015	0,006	0,002	
	Температура $T$ , К		400	400	400
Теплотворная способность конвертированного топлива, МДж/кмоль $C_2H_6O$			1454	1525	1545
Полная энтальпия $J$ , МДж/кмоль $C_2H_6O$			1477	1548	1569
2	Количество веществ в продуктах сгорания, кмоль/кмоль $C_2H_6O$	$N_2$	13,536	13,536	13,536
		$CO_2$	2,4	2,4	2,4
		$H_2O$	3,6	3,6	3,6
	Температура $T$ , К		834	955	997
Полная энтальпия $J$ , МДж/кмоль $C_2H_6O$			344,5	428,5	459,4
3	Температура $T$ , К		420	420	420
	Полная энтальпия $J$ , МДж/кмоль $C_2H_6O$		74,1	74,1	74,1
4	Температура $T$ , К		351	351	351
	Полная энтальпия $J$ , МДж/кмоль $C_2H_6O$		31,9	31,9	31,9
5	Температура $T$ , К		580	620	660
	Полная энтальпия $J$ , МДж/кмоль $C_2H_6O$		1518	1602	1633

Примечание: состав и теплотворная способность конвертированного топлива в точке 5 те же, что и в т. 1; состав продуктов сгорания в т. 3 и 4 тот же, что и в т. 2.

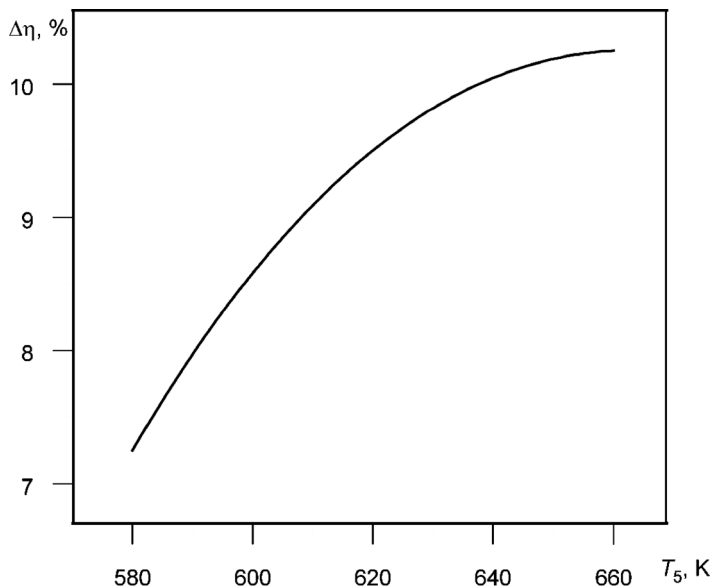
температуре кипения этанола при  $P = 0,1$  МПа (351 К). Кроме того, предполагалось, что состав реагирующей смеси на входе в реактор стехиометрический, а сжигание продуктов конверсии в ДВС производится без избытка воздуха. Параметры рабочих тел в характерных точках схемы представлены в таблице для трех значений конечной температуры продуктов конверсии  $T_5 = 580, 620$  и  $660$  К.

Для всех вариантов расчета КПД двигателя принимался равным  $\eta' = 0,38$  (по данным фирмы «Камминз»). Поскольку полная энтальпия конвертированного топлива  $J_1$  в точке 1 на рис. 2 существенно выше теплотворной способности этанола  $q$ , полезная работа двигателя возрастает за счет применения ТХР. КПД схемы определялся как  $\eta = J_1\eta'/q$ .

На рис. 3 представлены значения прироста КПД  $\Delta\eta = \eta - \eta'$  за счет применения ТХР в зависимости от конечной температуры конверсии  $T_5$ . Эти данные показывают, что термохимическая регенерация позволяет существенно повысить эффективность использования этанола, и его экономия может достигать 21%.

### Выводы

1. Реконструкция бензиновых двигателей, связанная с переходом на сжигание продуктов конверсии, значительно проще, чем в случае перехода на сжигание этанола.
2. ТХР является универсальным средством для повышения КПД ДВС.



**Рис. 3. Прирост КПД за счет термохимической регенерации.**

3. Расчеты показывают, что при использовании ТХР в ДВС, работающих на других видах жидкого топлива (бензине, дизтопливе и др.), повышение КПД будет иметь значение такого же порядка, как и в ДВС, работающих на этаноле.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Носач В.Г. Энергия топлива. – К.: Наук. думка, 1989. – 148 с.
2. Kweon C.-B., Khinkis M.J., Nosach V.G., Zabransky R.F. Advanced, high-efficiency, ultra-low emission, thermochemically recuperated reciprocating internal combustion engine. – US Patent No. 7210467, May 1, 2007.
3. White W.B., Johnson S.M., Dantzig G.B. Chemical equilibrium in complex mixtures // J. Chem. Phys. – 1958. – V. 28, No. 5. – P. 751 – 755.

Получено 18.03.2008 г.

УДК 536.245: 669.183.213

**КОШЕЛЬНИК О.В.**

*Институт проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України*

## ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКІВ ПРОЦЕСІВ СКЛАДНОГО ТЕПЛООБМІНУ В РЕГЕНЕРАТИВНИХ ТЕПЛООБМІННИКАХ З НЕРУХОМОЮ ВОГНЕТРИВКОЮ НАСАДКОЮ НАГРІВАЛЬНИХ І ПЛАВИЛЬНИХ ПЕЧЕЙ

Наведено методику розрахунку процесів складного теплообміну в каналах насадки регенеративних теплообмінників нагрівальних та плавильних печей доменного, коксохімічного, скло-робного виробництв із урахуванням особливостей їхньої експлуатації. Проведено дослідження інтенсивності теплообміну випромінюванням та конвективного для існуючих типів насадок регенераторів з різною формою й розмірами каналів, оцінено вплив окремих параметрів на інтенсивність теплообміну.

Приведена методика расчета процессов сложного теплообмена в каналах насадки регенеративных теплообменников нагревательных и плавильных печей доменного, коксохимического, стекольного производств с учетом особенностей их эксплуатации. Проведены исследования интенсивности теплообмена излучением и конвективного для существующих типов насадок регенераторов с различной формой и размерами каналов, оценено влияние отдельных параметров на интенсивность теплообмена.

The procedure of calculations of the complex heat transfer processes in the checkerwork channels of regenerative heat exchangers of heating and melting furnaces in blast-furnace, coke, and glass melting processes is presented. Analysis of the intensity of radiant and convective heat transfer for the existing types of regenerator checkerworks with various shapes and sizes of channels was carried out, and the influence of different factors on heat transfer intensity was estimated.