

УДК 536.7

НОСАЧ В.Г.¹, ШРАЙБЕР А.А.²¹Институт технической теплофизики НАН Украины²Институт общей энергетики НАН Украины

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ С ПОМОЩЬЮ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ

Аналізується можливість та доцільність застосування методу термохімічної регенерації теплоти для підвищення ефективності використання природного газу в різних теплоенергетичних установках.

Анализируется возможность и целесообразность применения метода термохимической регенерации теплоты для повышения эффективности использования природного газа в различных теплоэнергетических установках.

We analyze the possibility and expediency of application of the method of thermochemical recuperation for the enhancement of the efficiency of using natural gas in various thermal power plants.

I – энтальпия;
 J – полная энтальпия;
 K – коэффициент использования топлива;
 q – теплотворная способность;
 T – температура воздуха конвертированного топлива;
 β – коэффициент избытка реагента в реакции конверсии;

η – КПД двигателя (схемы);
 θ – температура продуктов сгорания;
 φ – доля рециркулирующих продуктов сгорания;
 ВЭ – водяной эквивалент;
 ГТУ – газотурбинная установка;
 ДВС – двигатель внутреннего сгорания;
 КИТ – коэффициент использования топлива;
 ТХР – термохимическая регенерация.

Введение

В последнее время наметилась стойкая тенденция к довольно быстрому росту цены природного газа. Поэтому изыскание путей повышения эффективности его использования в разнообразных теплоэнергетических установках привлекает внимание исследователей в различных странах. Кроме того, все ужесточающиеся экологические требования приводят к необходимости сокращения выбросов вредных веществ (в частности, оксидов азота) в атмосферу. Ниже обсуждается применимость возможных вариантов решения этих задач.

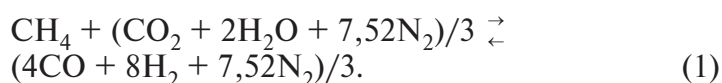
Для повышения эффективности использования природного газа в теплоэнергетической установке необходимо тем или иным образом утилизировать физическую теплоту продуктов сгорания на выходе из установки. Один из вариантов состоит в нагреве природного газа (ниже для упрощения будем

считать его состоящим только из метана), но его количество незначительно, и, кроме того, метан начинает разлагаться при достаточно низких температурах. Другая возможность связана с нагревом воздуха, подаваемого на горение метана, (воздушная регенерация), но и этот путь имеет два существенных недостатка: во-первых, количество воздуха и его теплоемкость меньше, чем соответствующие параметры продуктов сгорания, так что утилизировать их физическую теплоту можно лишь частично; во-вторых, при сжигании метана в горячем воздухе заметно возрастает температура горения и вместе с ней эмиссия NO_x .

Этих недостатков лишен принципиально иной вариант повышения эффективности использования природного газа – конверсия метана за счет физической теплоты уходящих газов (термохимическая регенерация), в результате чего получается новое топливо с существенно более высокой теплотворной способностью [1]. Это

топливо содержит значительное количество молекулярного водорода, горение которого сопровождается заметно меньшими выбросами NO_x по сравнению с метаном. Таким образом, термохимическая регенерация (ТХР) позволяет одновременно решить и экологические задачи. В настоящей статье приводятся анализ возможностей применения ТХР для различных теплоэнергетических установок, в частности, для двигателей внутреннего сгорания, промышленных печей и газовых турбин, а также некоторые результаты расчета эффективности этого метода.

В качестве реагента для конверсии метана можно использовать диоксин углерода либо водяной пар, однако это привело бы к значительному усложнению данной технологии. Наиболее простой и естественный путь — это использование в качестве реагента самих продуктов сгорания, которые содержат CO_2 и H_2O :



Для дальнейшего полагаем, что время пребывания реагирующей смеси в термохимическом реакторе достаточно велико, так что в результате реакции (1) получается равновесный состав конвертированного топлива. Для его нахождения наиболее целесообразно использовать метод поиска минимума суммарной энергии Гиббса реагирующей смеси, описанный в [2, 3].

Двигатели внутреннего сгорания (ДВС)

Для ДВС воздушная регенерация неприменима, т.к. в случае подачи нагретого воздуха в цилиндры двигателя его мощность существенно снизится, так что здесь ТХР представляет собой единственный способ повышения эффективности использования топлива. Приведем некоторые результаты расчета схем ТХР применительно к стехиометрическому двигателю с турбонаддувом QSK19 мощностью 350 кВт фирмы Cummins, который широко используется в США для привода компрессоров на газоперекачивающих станциях.

Рассматривались две тепловые схемы ТХР, различающиеся расположением реактора: (I) непосредственно после двигателя; (II) после газо-

вой турбины. Эти схемы представлены на рис. 1 с характерными точками 1 – 6, для которых ниже будут приведены численные результаты. Штриховыми линиями на рис. 1 показана рециркуляция продуктов сгорания, которая учитывается в некоторых вариантах расчета (см. ниже).

Были приняты следующие упрощающие предположения:

- 1) работа, произведенная газовой турбиной, полностью расходуется на привод компрессора, т.е. полезная работа системы — это работа ДВС;
- 2) потери давления и теплоты во всех аппаратах и трубопроводах пренебрежимо малы;
- 3) КПД двигателя (38,82% по данным Cummins) не меняется при сжигании конвертированного топлива вместо исходного.

Расчеты приводились для четырех режимов:

А — $\beta = 1$; $\varphi = 0$ ($\beta = 1$ соответствует левой части (1));

Б — $\beta = 1,363$; $\varphi = 0$;

В — $\beta = 1,726$; $\varphi = 0$;

Г — $\beta = 1$; $\varphi = 0,242$ (здесь значение φ выбрано так, чтобы суммарный расход продуктов сгорания был таким же, как и в режиме В).

Принимались следующие значения характерных температур: $T_1 = 323$ К; $\theta_4 = 373$ К; $\theta_2 = 940$ К для схемы I и 773,2 К для схемы II (по данным Cummins). Для каждого режима варьировалась температура θ_3 продуктов сгорания за реактором. Естественно, чем ниже θ_3 , тем больше количество теплоты, передаваемое реагирующей смеси, и вместе с ним степень регенерации. Однако здесь возникают два ограничения:

- поскольку водяной эквивалент (ВЭ) продуктов сгорания намного больше, чем ВЭ реагирующей смеси, то при фиксированной температуре θ_2 решение системы уравнений, описывающих рабочий процесс в термохимическом реакторе, для достаточно низких θ_3 не существует;

- чем ниже θ_3 , тем больше должна быть теплообменная поверхность реактора.

Некоторые численные результаты в качестве примера представлены в табл. 1 и 2 для схем I и II соответственно, а также на рис. 2. Здесь варианты 1 и 2 соответствуют режиму А, 3 и 4 — Б, 5, 6 и 7 — В, а варианты 8 и 9 — режиму Г; высота термохимического реактора H рассчитана применительно к его габаритам в плане 0,8 x 0,8 м.

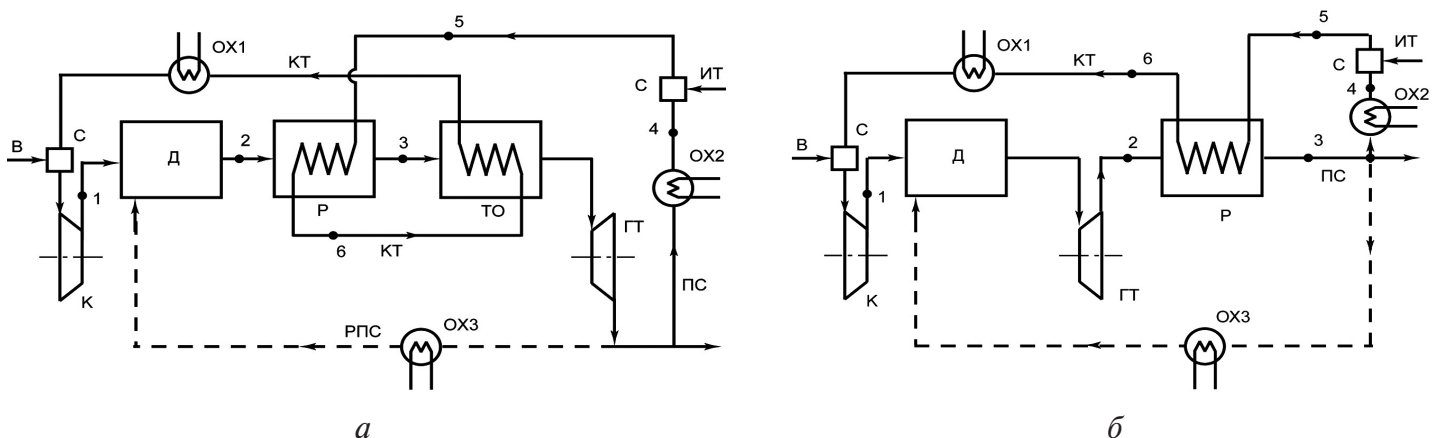


Рис. 1. Схемы ТХР для двигателя внутреннего сгорания с турбонаддувом:
а – схема I; *б* – схема II; Д – двигатель; Р – термохимический реактор; ТО – теплообменник; ГТ – газовая турбина; К – компрессор; С – смеситель; ОХ1 – ОХ3 – охладители; В – воздух; ИТ – исходное топливо; КТ – конвертированное топливо; ПС – продукты сгорания; РПС – рециркуляция продуктов сгорания.

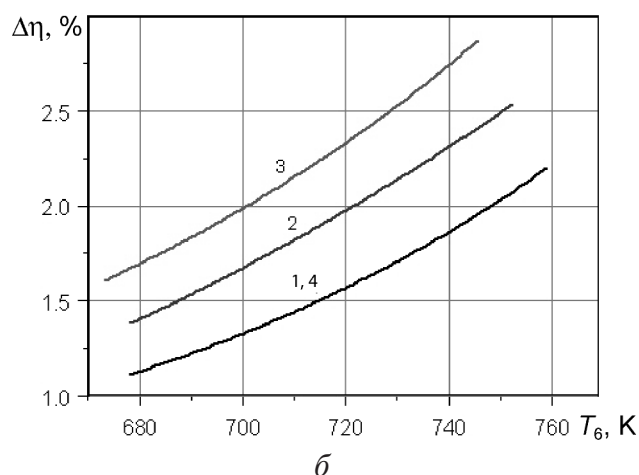
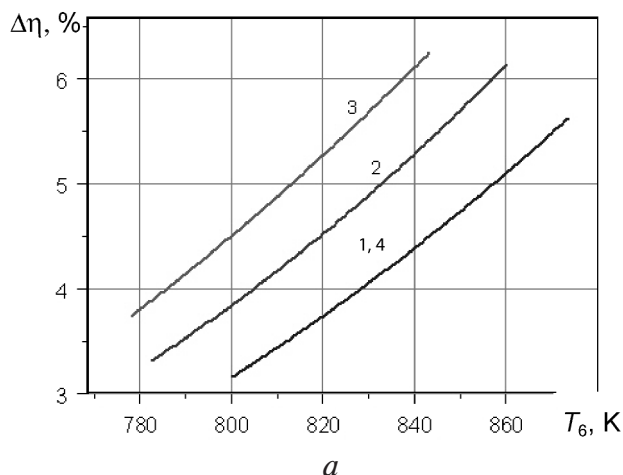


Рис. 2. Прирост КПД двигателя за счет ТХР в зависимости от температуры конвертированного топлива после реактора для схем I (а) и II (б). Кривые 1 – 4 соответствуют режимам А – Г.

Как и в [3], схема I обеспечивает значительно более высокую степень конверсии, чем схема II. Соответственно и прирост КПД за счет ТХР значительно выше при расположении реактора непосредственно после двигателя: 4...6% (абс.) против 1,5...2,5%. Вариант 7 в табл. 1 обеспечивает очень высокую эффективность использования топлива ($\eta = 44,83\%$), но при этом теплообменная поверхность реактора должна быть достаточно большой. Далее, сравнение режимов А, Б и В показывает, что эффективность схемы возрастает с ростом коэффициента избытка реагента, однако и здесь возникает ограничение: чем больше β , тем меньше теплотворная способность конверти-

рованного топлива на единицу объема. Из рис. 2 видно, что при одинаковых конечных температурах конвертированного топлива величина $\Delta\eta$ не зависит от рециркуляции продуктов сгорания.

В табл. 3 приведены некоторые параметры схемы I для двух вариантов режимов А, Б и В, которые дают достаточно большие $\Delta\eta$ при умеренных габаритах реактора. Видно, что ограничиваясь $H \leq 3$ м, при высоком β можно получить прирост КПД схемы более 5,6%. Таким образом при сравнительно невысокой температуре уходящих газов двигателя метод ТХР позволяет существенно – на 14% (отн.) повысить эффективность использования топлива и соответственно сократить его расход.

Табл. 1. Результаты расчета схемы I (рис. 1, а)

№ точки на рис. 1, а	Параметры	№ варианта									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	Состав конвертированного топлива, кмоль/кмоль CH_4	CH_4	0,631	0,5972	0,656	0,582	0,664	0,595	0,457	0,587	0,513
		N_2	2,507	2,507	3,417	3,417	4,327	4,327	4,327	4,327	4,327
		H_2	1,032	1,191	1,10	1,288	1,123	1,309	1,657	1,215	1,393
		CO_2	0,352	0,316	0,523	0,489	0,703	0,680	0,615	0,310	0,267
		CO	0,319	0,420	0,275	0,383	0,221	0,312	0,515	0,436	0,554
		H_2O	0,310	0,281	0,496	0,456	0,724	0,677	0,604	0,277	0,247
1	Температура T, K	323	323	323	323	323	323	323	323	323	
	Теплотворная способность конвертированного топлива $q, \text{МДж/кмоль CH}_4$	871,1	886,0	870,3	887,0	866,8	882,0	913,1	888,3	905,3	
2	Полная энтальпия $J, \text{МДж/кмоль CH}_4$	N_2	879,5	894,6	880,7	897,6	879,5	894,9	926,2	896,8	914,0
		CO_2	10,027	10,027	10,937	10,937	11,848	11,848	11,848	11,848	11,848
		CO	1,333	1,333	1,454	1,454	1,575	1,575	1,575	1,575	1,575
		H_2O	2,667	2,667	2,909	2,909	3,151	3,151	3,151	3,151	3,151
2	Температура θ, K	942,9	940,9	943,1	941	941,4	939,6	939	940,3	939,9	
	Энтальпия $I, \text{МДж/кмоль CH}_4$	300,8	299,8	327,8	326,6	354,5	353,5	353,2	353,9	353,7	
3	θ, K	625	580	625	580	630	590	510	630	590	
	$I, \text{МДж/кмоль CH}_4$	147,6	126,6	160,8	138	177,1	155,1	111,7	177,1	155,1	
4	θ, K	373	373	373	373	373	373	373	373	373	
	Состав реагирующей смеси, кмоль/кмоль CH_4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
5	CH_4	N_2	2,507	2,507	3,417	3,417	4,328	4,328	4,328	2,507	2,507
		CO_2	0,333	0,333	0,454	0,454	0,575	0,575	0,575	0,333	0,333
		H_2O	0,667	0,667	0,909	0,909	1,151	1,151	1,151	0,667	0,667
6	θ, K	354	354	357,5	357,5	361	361	361	354	354	
	T, K	819,8	841,8	798,7	822,4	778	800,1	837	845	868,1	
6	$J, \text{МДж/кмоль CH}_4$	$J, \text{МДж/кмоль CH}_4$	963,2	983,3	979,5	1002,8	992,9	1015,4	1059,3	986,2	1008,9

Продолжение табл. 1

КПД схемы η , %	42,56	43,29	42,62	43,43	42,56	43,3	44,83	43,39	44,23
КПД без ТХР η , %	38,82	38,82	38,82	38,82	38,82	38,82	38,82	38,82	38,82
Приrost КПД $\Delta\eta$, %	3,74	4,47	3,8	4,61	3,74	4,48	6,01	4,57	5,41
Теплообменная поверхность термодимического реактора F , м ²	59,8	11,08	52,1	89,1	47	70	224	86,5	180,7
Высота реактора H , м	1,175	2,175	1,025	1,75	0,925	1,375	4,4	1,7	3,55

Примечание: газовая смесь в точке 1 содержит также воздух ($2O_2 + 7,52 N_2$); состав рабочего тела (СРТ) в точках 3 и 4 тот же, что и в точке 2; СРТ (только конвертированное топливо) и q в точке 6 те же, что и в точке 1.

Табл. 2. Результаты расчета схемы II (рис. 1, б)

№ точки на рис. 1, б	Параметры	№ варианта									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	Состав конвертированного топлива, кмоль/ кмоль CH_4	CH_4	0,913	0,857	0,919	0,866	0,929	0,879	0,747	0,890	0,830
		N_2	2,507	2,507	3,417	3,417	4,327	4,327	4,327	2,507	2,507
		H_2	0,325	0,510	0,309	0,495	0,274	0,456	0,885	0,404	0,590
		CO_2	0,398	0,413	0,521	0,546	0,649	0,681	0,714	0,407	0,412
		CO	0,022	0,064	0,014	0,042	0,009	0,027	0,126	0,037	0,091
		H_2O	0,515	0,444	0,761	0,682	1,042	0,960	0,795	0,483	0,417
1	Температура T , К	323	323	323	323	323	323	323	323	323	
1	Теплотворная способность конвертированного топлива q , МДж/кмоль CH_4	817,5	828,6	816,2	826,1	814,3	823,2	849,2	822,0	834,1	
		825,2	836,5	826,0	836,1	826,4	835,4	861,7	829,9	842,2	
	Полная энтальпия J , МДж/кмоль CH_4										

Продолжение табл. 2

2	Состав продуктов сгорания, кмоль/кмоль CH_4	N_2	10,027	10,027	10,937	10,937	11,848	11,848	11,848	11,848	11,848	11,848	
		CO_2	1,333	1,333	1,454	1,454	1,575	1,575	1,575	1,575	1,575	1,575	1,575
		H_2O	2,667	2,667	2,909	2,909	3,151	3,151	3,151	3,151	3,151	3,151	3,151
3	Температура θ , К		773,1	775,6	772,7	770,4	774,7	775,3	774,3	772,2	773,9	773,9	
		Энтальпия I , МДж/кмоль CH_4	217,8	219,0	237,7	236,2	258,3	258,3	258,7	258	256,9	257,8	
		θ , К	625	580	625	580	630	630	590	500	630	590	
4	I , МДж/кмоль CH_4		147,6	126,6	160,8	138	177,1	155,1	106,3	177,1	155,1	155,1	
		θ , К	373	373	373	373	373	373	373	373	373	373	
		Состав продуктов сгорания, кмоль/кмоль CH_4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
5	Состав продуктов сгорания, кмоль/кмоль CH_4	N_2	2,507	2,507	3,417	3,417	4,328	4,328	4,328	4,328	2,507	2,507	
		CO_2	0,333	0,333	0,454	0,454	0,575	0,575	0,575	0,575	0,333	0,333	
		H_2O	0,667	0,667	0,909	0,909	1,151	1,151	1,151	1,151	0,667	0,653	
6	θ , К		354	354	357,5	357,5	361	361	361	361	354	354	
		T , К	678,1	726,5	653,9	699,3	629	674,1	745,7	700,6	744,1	744,1	
		J , МДж/кмоль CH_4	879,6	900,3	888,6	909,4	896,1	917,5	965,3	888,5	909,5	909,5	
КПД схемы η , %			39,93	40,48	39,97	40,45	39,99	40,42	41,7	40,15	40,75	40,75	
КПД без ТХР η° , %			38,82	38,82	38,82	38,82	38,82	38,82	38,82	38,82	38,82	38,82	
Прирост КПД $\Delta\eta$, %			1,11	1,66	1,15	1,63	1,17	1,60	2,88	1,33	1,93	1,93	
Теплообменная поверхность термохимического реактора F_3 , м ²			21,6	52,1	19,1	40,6	17,8	31,8	201,2	28	75	75	
Высота реактора H , м			0,425	1,025	0,375	0,8	0,35	0,625	3,95	0,55	1,475	1,475	

Примечание: газовая смесь в точке 1 содержит также воздух ($2\text{O}_2 + 7,52 \text{N}_2$); состав рабочего тела (СРТ) в точках 3 и 4 тот же, что и в точке 2; СРТ (только конвертированное топливо) и q в точке 6 те же, что и в точке 1.

Табл. 3. Характеристики некоторых режимов для схемы I (рис. 1, а)

Параметры	Режимы					
	А		Б		В	
θ_3, K	570	560	560	540	550	530
T_6, K	848,5	852,4	829,9	840,9	818,7	827,8
$\Delta\eta, \%$	4,7	4,84	4,89	5,32	5,23	5,61
$F, \text{м}^2$	132,2	162,7	117	164	114,5	152,7
$H, \text{м}$	2,6	3,2	2,3	3,23	2,25	3,0

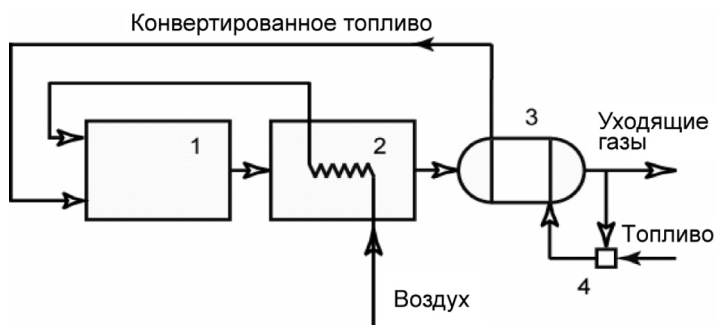


Рис. 3. Схема комбинированной системы воздушной и термохимической регенерации для промышленной печи: 1 – печь; 2 – воздухоподогреватель; 3 – термохимический реактор; 4 – смеситель.

Промышленные печи

На проведение технологического процесса в промышленных печах расходуется лишь незначительная часть теплоты, выделяющейся при сжигании природного газа в то время как ее большая часть теряется с уходящими газами, через наружные поверхности печи и др. Воздушная регенерация позволяет повысить коэффициент использования топлива (КИТ) на 25...30%, однако возможности этого метода практически исчерпаны прежде всего в связи с тем, что нагрев воздуха выше 900...1000 К требует применения специальных, очень дорогих материалов.

По-видимому, оптимальный вариант повышения эффективности использования природного газа в промышленных печах – это комбинация воздушной и термохимической регенерации в соответствии, например, со схемой, изображенной на рис. 3. Продукты сгорания после печи поступают в термохимический реактор и затем – в воздухоподогреватель. Возможны и иные вари-

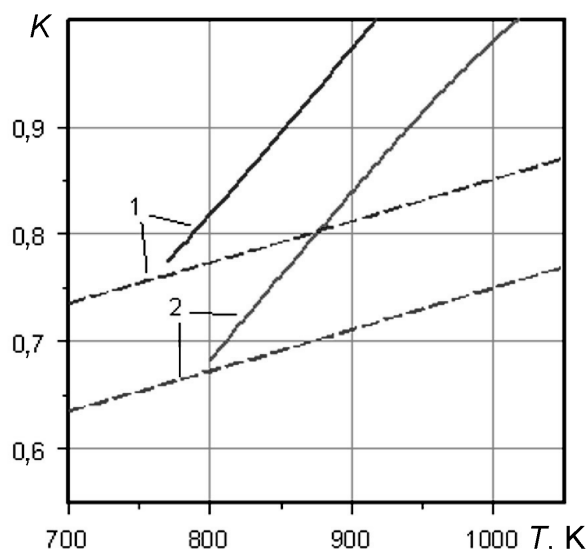


Рис. 4. Зависимость коэффициента использования топлива от конечной температуры воздуха и продуктов конверсии при различных температурах уходящих газов после печи: 1 – $\theta = 1200 \text{ K}$; 2 – 1400 K ; штриховые линии – воздушная регенерация; сплошные – комбинированная регенерация.

анты организации процесса, например, объединение термохимического реактора и воздухоподогревателя в один аппарат, что, по-видимому, позволит более эффективно использовать теплоту уходящих газов.

Некоторые результаты расчетов эффективности комбинированной системы регенерации приведены на рис. 4 (здесь предполагается, что температуры конвертированного топлива и нагретого воздуха одинаковы). Если для печи с температурой уходящих газов $\theta = 1400 \text{ K}$ нагревать воздух и конвертированное топливо до 1000 К, схема позволяет обеспечить почти полную регенерацию. Следует заметить, что резуль-

Табл. 4. Эффективность использования ТХР для ГТУ

Параметры	Значения		
	1,5	2,0	2,5
Начальное давление, МПа	1,5	2,0	2,5
Начальная температура, К	1400	1400	1400
КПД без регенерации, %	39,6	40,9	41,5
КПД с регенерацией, %	51,6	51,4	51,0
Прирост КПД, % (абс.)	12,0	10,5	9,5

таты расчетов были подтверждены промышленными испытаниями одной из печей для нагрева металла на заводе “Узбекхиммаш”.

Газотурбинные установки

Коэффициент полезного действия современных газотурбинных установок (ГТУ), как правило, не превышает 30%. Один из путей его увеличения состоит в повышении начальных параметров теплосилового цикла, однако такие возможности на сегодняшний день практически исчерпаны. Как и в п. 3, наиболее целесообразный вариант здесь, по-видимому, связан с комбинированной системой регенерации теплоты – подогревом воздуха + ТХР. Следует отметить, что на пути использования ТХР для ГТУ возникают две трудности: во-первых, степень конверсии природного газа (см. (1)) быстро растет с повышением температуры продуктов сгорания, поступающих в термохимический реактор в качестве теплоносителя, в то время как температура уходящих газов современных ГТУ довольно низкая; во-вторых, ГТУ обычно работают с высоким коэффициентом избытка воздуха, но степень конверсии резко снижается, если реагирующая смесь, поступающая в реактор, содержит кислород. Однако эти трудности могут быть преодолены за счет использования специальных приемов, разработанных в ИТТФ НАН Украины.

Некоторые результаты расчетов комбинированной системы регенерации с использованием упомянутых специальных приемов представлены в табл. 4. Видно, что комбинированная регенерация позволяет довести КПД газотурбинной установки почти до уровня, который имеют современные парогазовые установки. С повышением

начального давления КПД установки без регенерации возрастает, но для ГТУ с регенерацией – падает. Последний факт объясняется тем, что реакция (1) приводит к увеличению объема веществ, так что при прочих равных условиях с ростом давления степень конверсии снижается. При применении комбинированной системы регенерации в ГТУ, входящей в состав парогазовой установки, ее КПД повысится примерно на такую же величину, как и в табл. 4.

Выводы

1. Проведены численные исследования эффективности применения термохимической регенерации для повышения КПД двигателей внутреннего сгорания и газотурбинных установок, а также КИТ в промышленных печах. Показано, что эта мера (в особенности совместно с воздушной регенерацией для ГТУ и печей) приводит к существенному повышению эффективности использования природного газа.

2. Для ДВС термохимическая регенерация является единственным возможным вариантом существенного повышения КПД. Кроме того, сжигание продуктов конверсии вместо природного газа позволяет одновременно решить и важную экологическую задачу снижения выбросов NO_x в атмосферу. Исследования в данной области с целью практической реализации метода ТХР в настоящее время интенсивно ведутся в США с участием авторов данной статьи [4].

3. Таким образом, можно констатировать, что ТХР является универсальным средством для радикального решения как экономических, так и экологических проблем использования природного газа в теплоэнергетических установках.

ЛИТЕРАТУРА

1. Носач В.Г. Энергия топлива. — К.: Наук. думка, 1989. — 148 с.

2. White W.B., Johnson S.M., Dantzig G.B. Chemical equilibrium in complex mixtures // J. Chem. Phys. — 1958. — V. 28, №. 5. — P. 751 — 755.

3. Носач В.Г., Шрайбер А.А. Повышение эффективности использования биогаза в теплоэнергетических установках с помощью термохи-

мической регенерации // Промышленная теплотехника. — 2009. — Т. 31, № 2 — С. 57–63.

4. 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 № 7210467, May 1, 2007.

Получено 13.11.2008 г.