

УДК 536.7

Носач В.Г.¹, Шрайбер А.А.²¹*Институт технической теплофизики НАН Украины*²*Институт общей энергетики НАН Украины*

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БИОГАЗА В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ С ПОМОЩЬЮ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ

Виконано широкі числові дослідження ефективності застосування термохімічної регенерації для двигуна внутрішнього згоряння, що працює на біогазі. Показано, що цей метод дозволяє істотно підвищити ККД двигуна – на ~5,5% (абс.) на оптимальних режимах.

Проведены широкие численные исследования эффективности применения термохимической регенерации для двигателя внутреннего сгорания, работающего на биогазе. Показано, что этот метод позволяет существенно повысить КПД двигателя – на ~5,5% (абс.) на оптимальных режимах.

We have carried out wide numerical investigations of the efficiency of applying the method of thermochemical recuperation for an internal combustion engine working on biogas. We show that this method enables one to increase substantially the engine efficiency – by ~5,5% under optimal conditions.

a_{ij} – матрица стехиометрических коэффициентов;
 b_j – количество молей компонента j в исходной смеси;
 f_i, F – свободная энергия вещества i и смеси;
 I – энтальпия;
 J – полная энтальпия;
 n, m – количество веществ и компонентов;
 P – давление;
 q – теплотворная способность;
 R – универсальная газовая постоянная;
 T – температура конвертированного топлива;
 β – коэффициент избытка реагента в реакции конверсии;
 γ – доля продуктов сгорания, добавляемых к биогазу для конверсии;
 ΔZ_i – стандартная свободная энергия вещества i ;
 η – КПД двигателя (схемы);
 θ – температура продуктов сгорания;
 ДВС – двигатель внутреннего сгорания;

ТХР – термохимическая регенерация.

Введение

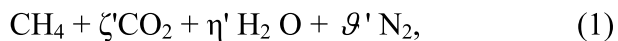
По оценкам специалистов запасы углеводородов будут практически полностью исчерпаны в течение ближайших 40–50 лет. Поэтому во многих странах серьезное внимание уделяется разработке технологий использования альтернативных источников энергии, среди которых наиболее легко утилизируемым является биомасса (древесина и отходы ее переработки, отходы растениеводства и животноводства и др.). К числу достоинств биомассы как энергоносителя относятся ее значительный потенциал и возобновляемость, возможность существенного снижения выбросов парниковых газов и оксидов азота в атмосферу, предельно низкая стоимость и др. В частности, одним из наиболее доступных и эффективных энергоносителей является биогаз, который может быть использован для широкого класса энергетических установок, в том числе газотурбинных установок и двигателей внутреннего сгорания. В последнее время многими известными фирмами (General Electric, Cummins, Jenbacher и др.) разработан ряд дизельных двигателей, рабо-

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

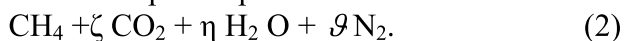
тающих на биогазе и отличающихся сравнительно высокими техническими и экономическими характеристиками. Вместе с тем существует возможность существенного повышения эффективности таких двигателей за счет применения метода термохимической регенерации (ТХР) [1] биогаза. Ниже приводятся некоторые результаты расчетно-аналитического исследования эффективности применения ТХР для ДВС на биогазе.

Определение состава продуктов конверсии биогаза

Прежде всего необходимо определить состав продуктов конверсии биогаза при заданных условиях. Пусть в общем случае биогаз имеет такой состав:

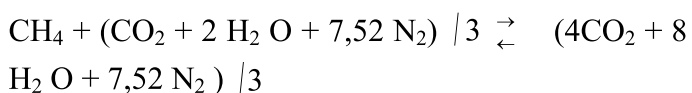


где значения ζ' , η' , ϑ' , могут быть произвольными, а реагирующая смесь, поступающая в термохимический реактор имеет состав:



Следует заметить, что содержание даже небольших количеств кислорода в реагенте резко снижает полноту процесса конверсии, так что считаем коэффициент избытка воздуха при горении равным единице.

Возможны ситуации, когда содержание окислителей в биогазе (1) достаточно для конверсии метана, если $(\zeta' + \eta' \geq 1)$, однако необходимым условием здесь является также содержание в реагенте значительного количества инертных компонентов, которые могли бы аккумулировать достаточное для проведения процесса количество теплоты. В частности, при стехиометрической конверсии метана с продуктами сгорания



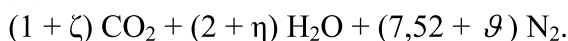
соотношение между инертным компонентом и окислителем $\varphi \approx 2,5$. Будем считать, что при стехиометрической конверсии биогаза это соотношение следует поддерживать на том же уровне, т.е. $k \equiv \zeta + \eta + \vartheta \approx 3,5$. Если же коэффициент избытка реагента при конверсии $\beta > 1$, то естественно положить $k = 3,5 \beta$.

Обозначим через γ долю продуктов сгорания, которые добавляются к биогазу для конверсии. Тогда из (1), (2) нетрудно получить:

$$\gamma = \frac{k - \zeta' - \eta' - \vartheta'}{k + 10,52}; \quad \zeta = \frac{\gamma + \zeta'}{1 - \gamma}; \quad \eta = \frac{2\gamma + \eta'}{1 - \gamma};$$

$$\vartheta = \frac{7,52\gamma + \vartheta'}{1 - \gamma}. \quad (3)$$

Состав продуктов сгорания конвертированного газа:



Положим, что время пребывания реагирующей смеси в термохимическом реакторе достаточно велико, так что состав конвертированного газа при заданной температуре можно считать равновесным. Методы определения равновесного состава реагирующей газовой смеси разделяются на два класса:

- расчет с использованием констант равновесия основных реакций;
- поиск минимума энергии Гиббса для смеси.

Использование методов первого класса требует значительного объема информации о главных реакциях в смеси и о веществах, преобладающих в состоянии равновесия, т.е. эти методы нельзя считать универсальными. Методы второго класса лишены этих недостатков: здесь не требуется какая-либо информация а priori, и возможен расчет широкой гаммы смесей. По-видимому, наиболее универсален и прост в реализации метод крутого спуска Уайта [2]. Если количество молей веществ в смеси есть $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, свободная энергия смеси может быть представлена в виде:

$$F(X) = \sum_{i=1}^n x_i \left(\mu_i + \ln \frac{x_i}{\bar{x}} \right); \quad \mu_i = \frac{\Delta Z_i}{RT} + \ln P; \quad \bar{x} = \sum_{i=1}^i x_i. \quad (4)$$

Из n веществ, составляющих рассматриваемую смесь, выбирают m веществ (именуемых компонентами) так, что количество их молей можно менять независимо, т.е. ни один из компонентов не может быть получен из других с помощью любых химических реакций. Задача сводится к нахождению такого значения вектора X с положительными x_i , которое обеспечит минимум функции F (4) и удо-

влетворяет очевидным уравнениям материального баланса

$$\sum_{i=1}^n a_{ij} x_i = b_j \quad (j = 1, 2, \dots, m). \quad (5)$$

Для решения задачи выбирается некое начальное приближение $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ с положительными y_i , удовлетворяющее условиям (5), и $F(X)$ раскладывается в ряд Тейлора вблизи "точки" Y , причем в разложении удерживаются только линейные и квадратные члены. Это позволяет определить направление крутого спуска (антиградиента F) в точке Y и сделать шаг в этом направлении до некоторой точки Y_1 , так что $F(Y_1) < F(Y)$.

После определенного количества шагов удается достичь минимума F (с заданной точностью).

Исходные данные для расчета

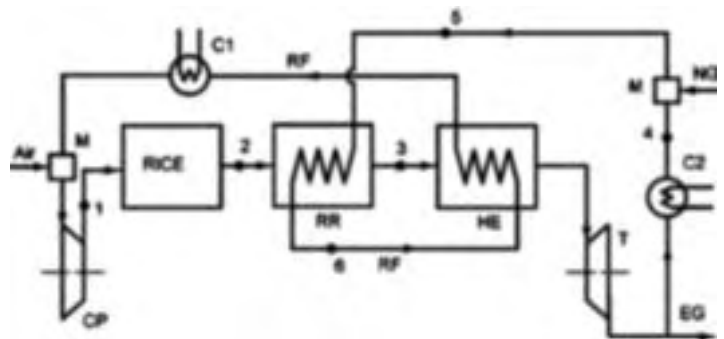
Расчеты проводились применительно к стехиометрическому двигателю QSK19 мощностью 350 кВт фирмы Cummins с турбонаддувом. При этом рассматривались две тепловые схемы ТХР, различающиеся расположением термохимического реактора: (I) непосредственно после двигателя; (II) после газовой турбины. Эти схемы показаны на рис. 1 с характерными точками 1 – 6, для которых ниже будут приведены результаты расчётов. При использовании схемы I температура продуктов сгорания существенно снижается после реактора, и для ее повышения перед газовой турбиной предусмотрен дополнительный теплообменник (рис. 1, а), что позволяет также сократить потери теплоты на охлаждение продуктов конверсии перед их подачей в двигатель.

При проведении расчётов использовались следующие упрощающие предпосылки:

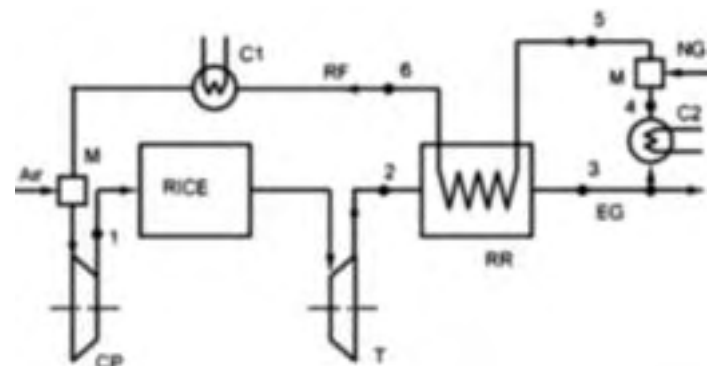
- работа, производимая газовой турбиной, расходуется на привод компрессора, так что полезная работа всей системы – это работа, производимая двигателем;
- потери давления и теплоты во всех трубопроводах и теплообменниках пренебрежимо малы;

– КПД двигателя (38,82% по данным Cummins) не меняется при использовании конвертированного топлива по сравнению с исходным.

Приняты следующие значения исходных 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) Расчеты проводились применительно к составу биогаза 50% $CH_4 + 50\% CO_2$ (по объему) для трех значений β : 1; 1,18 и 1,36 (ниже эти режимы обозначаются А, Б и В); при этом в соответствии с (3) $\gamma = 0,1787$; 0,2139 и 0,2461.



а,



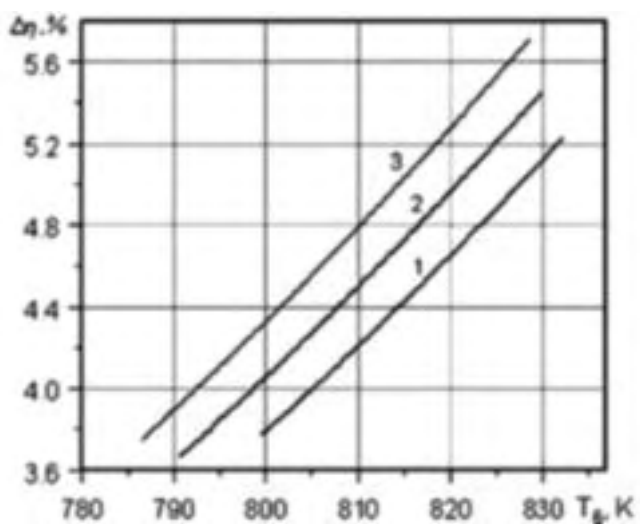
б,

Рис.1. Схемы ТХР для двигателя QSK19:
 а – схема I; б – схема II; Д – двигатель; Р – термохимический реактор; ТО – теплообменник; ГТ – газовая турбина; К – компрессор; С – смеситель; ОХ1, ОХ2 – охладители; В – воздух; ИТ – исходное топливо; КТ – конвертированное топливо; ПС – продукты сгорания.

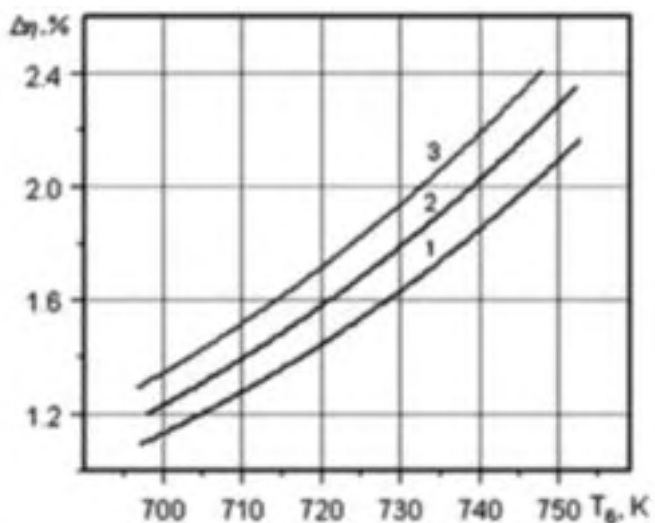
ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

Некоторые численные результаты

Некоторые результаты проведенных расчетов представлены в табл. 1 и 2 для схем I и II соответственно (варианты 1–3 соответствуют режиму А, 4–6 – режиму Б и 7–9 – режиму В), а также на рис. 2. Следует отметить, что особенности использованного метода расчета термодинамического реактора не позволяют получить точное (заданное) значение θ_2 : расчет проводится



а)



б)

Рис. 2. Прирост КПД двигателя за счет применения термодинамической регенерации от температуры конвертированного топлива после реактора для схем I (а) и II (б) (кривые 1–3 соответствуют режимам А, Б и В).

начиная с «холодного» конца реактора, где задается температура θ_3 , причем его теплообменная поверхность может изменяться только дискретно – она должна состоять из целого числа рядов труб.

Полученные результаты показывают, что схема I обеспечивает значительно более высокую степень конверсии, чем схема II. Соответственно и возрастание эффективности применения ТХР больше при расположении реактора непосредственно после двигателя (прирост КПД здесь 4,5...5,5% (абс.) по сравнению с 1,5...2,3% для схемы II). Далее, эффективность заметно возрастает с уменьшением температуры θ_3 уходящих газов после реактора, но при этом, естественно, увеличивается необходимая теплообменная поверхность термодинамического реактора. При прочих равных условиях КПД схемы увеличивается с ростом β , однако здесь следует иметь в виду, что одновременно снижается и теплотворная способность конвертированного топлива на единицу объема, что может приводить к определенным трудностям при его сжигании (этот аспект здесь не рассматривается).

В заключение следует отметить, что расчет теплообмена в термодинамическом реакторе приводит к вполне умеренным его габаритам: при сечении реактора в плане 0,8 x 0,8 м его высота даже при максимальных $\Delta\eta$ не превышает 3...3,5 м (табл. 1, 2). Важным достоинством метода ТХР является также то, что здесь не требуется реконструкция самого двигателя – достаточно лишь модернизировать систему его питания для перехода на конвертированное топливо.

Таблица 1. Результаты расчета схемы 1

№ точки на рис.1а	Параметры	№ варианта									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	Состав конвертированного топлива, кмоль/кмоль СН ₄	СН ₄	0,631	0,587	0,570	0,665	0,602	0,547	0,659	0,595	0,543
		N ₂	1,637	1,637	1,637	2,046	2,046	2,046	2,046	2,455	2,455
		H ₂	0,807	0,892	0,925	0,779	0,903	1,011	0,825	0,953	1,057
		CO ₂	1,136	1,089	1,071	1,318	1,253	1,196	1,455	1,390	1,337
		CO	0,669	0,759	0,794	0,561	0,689	0,802	0,539	0,668	0,773
2	Температура T, К	H ₂ O	0,366	0,369	0,370	0,435	0,437	0,439	0,509	0,510	0,511
		Теплотворная способность конвертированного топлива q, МДж/кмоль СН ₄	323	323	323	323	323	323	323	323	323
		Полная энтальпия J, МДж/кмоль СН ₄	890,7	901,6	905,9	880,6	896,3	910,0	880,7	896,3	909,6
		Состав продуктов сгорания, кмоль/кмоль СН ₄	895,0	905,9	910,2	885,3	901,1	914,9	885,9	902,1	915,2
		Температура θ, К	915,7	915,7	915,7	915,7	915,7	915,7	915,7	915,7	915,7
3	Энтальпия J, МДж/кмоль СН ₄	CO ₂	2,435	2,435	2,435	2,544	2,544	2,544	2,544	2,653	2,653
		H ₂ O	2,435	2,435	2,435	2,544	2,544	2,544	2,544	2,653	2,653
		Температура θ, К	941,7	940,7	941,1	939,7	938,7	940,6	938,8	937,8	939,2
		θ, К	310,7	310,2	310,4	323,6	323,0	324,0	336,9	336,3	337,1
		J, МДж/кмоль СН ₄	580	550	540	600	560	520	600	560	530
4	Состав реагирующей смеси, кмоль/кмоль СН ₄	θ, К	130,4	116,1	111,3	146,3	126,3	111,3	152,6	131,7	116,1
		θ, К	373	373	373	373	373	373	373	373	373
		Состав реагирующей смеси, кмоль/кмоль СН ₄	1	1	1	1	1	1	1	1	1
		N ₂	1,637	1,637	1,637	2,046	2,046	2,046	2,455	2,455	2,455
		CO ₂	1,435	1,435	1,435	1,544	1,544	1,544	1,653	1,653	1,653
5	Температура θ, К	H ₂ O	0,435	0,435	0,435	0,544	0,544	0,544	0,653	0,653	0,653
		θ, К	337	337	337	340,5	340,5	340,5	344	344	344
		T, К	816,3	827,9	832,2	799,1	816,0	829,8	793,7	810,7	823,6
		J, МДж/кмоль СН ₄	989,3	1003,2	1008,5	986,0	1006,4	1022,8	995,7	1016,6	1033,6
		КПД схемы η, %	43,30	43,84	44,15	42,84	43,60	44,27	42,87	43,65	44,28
6	КПД без ТХР η ⁰ , %	η ⁰ , %	38,82	38,82	38,82	38,82	38,82	38,82	38,82	38,82	38,82
		Приrost КПД Δη, %	4,48	5,02	5,23	4,02	4,78	5,45	4,05	4,83	5,46
		Теплообменная поверхность термодинамического реактора F, м ²	93	152,9	195	66,2	112	204	63,7	105,7	175,5
		Высота реактора H, м	1,825	3,0	3,825	1,3	2,2	4,0	1,25	2,075	3,45

Примечание: газовая смесь в точке 1 содержит также воздух (2O₂ + 7,52 N₂); 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.

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

Таблица 2. Результаты расчета схемы 2

№ точки на рис.1б	Параметры	№. Варианта									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	CH ₄	0,865	0,847	0,82	0,865	0,840	0,817	0,869	0,828	0,80	
	N ₂	1,637	1,637	1,637	2,046	2,046	2,046	2,455	2,455	2,455	
	Состав конвертированного топлива, кмоль/ кмольCH ₄	H ₂	0,350	0,387	0,431	0,374	0,428	0,475	0,383	0,477	0,525
		CO ₂	1,380	1,363	1,341	1,512	1,491	1,471	1,643	1,612	1,594
		CO	0,190	0,225	0,269	0,167	0,213	0,256	0,141	0,213	0,254
		H ₂ O	0,355	0,354	0,354	0,441	0,437	0,435	0,532	0,521	0,517
Температура T, К	323	323	323	323	323	323	323	323	323	323	
2	Теплотворная способность конвертированного топлива q, МДж/кмоль CH ₄	832,4	836,8	842,2	831,5	837,5	843,0	829,7	839,5	844,9	
	Полная энтальпия J МДж/кмоль CH ₄	836,2	840,7	846,1	835,8	841,9	847,4	834,6	844,6	850,0	
		N ₂	9157	9,157	9,157	9,566	9,566	9,566	9,975	9,975	9,975
		CO ₂	2,435	2,435	2,435	2,544	2,544	2,544	2,653	2,653	2,653
	Состав продуктов сгорания, кмоль/кмоль CH ₄	H ₂ O	2,435	2,435	2,435	2,544	2,544	2,544	2,653	2,653	2,653
		Температура θ, К	774,8	774,1	775,0	774,9	773,9	771,0	771,2	773,1	774,6
3	Энтальпия I, МДж/кмоль CH ₄	226,0	225,6	226,1	236,1	235,6	234,1	244,2	245,2	246,1	
	θ, К	560	540	530	560	540	520	560	530	515	
	I, МДж/кмоль CH ₄	120,8	111,3	106,6	126,3	116,3	106,4	131,7	116,1	108,3	
4	θ, К	373	373	373	373	373	373	373	373	373	
	Состав продуктов сгорания, кмоль/кмоль CH ₄	CH ₄	1	1	1	1	1	1	1	1	
N ₂		1,637	1,637	1,637	2,046	2,046	2,046	2,455	2,455	2,455	
6	H ₂ O	0,435	0,435	0,435	0,544	0,544	0,544	0,653	0,653	0,653	
		θ, К	337	337	337	340,5	340,5	340,5	344	344	344
	T, К	730,1	743,6	750,3	722,2	735,6	746,2	712,3	734,3	744,3	
		J, МДж/кмоль CH ₄	910,6	918,0	925,0	917,1	926,5	934,6	921,9	937,6	9457
	КПД схемы η, %	40,47	40,68	40,95	40,44	40,74	41,0	40,38	40,86	41,12	
	КПД без ТХР η ⁰ , %	38,82	38,82	38,82	38,82	38,82	38,82	38,82	38,82	38,82	
Приrost КПД Δη, %	1,65	1,86	2,13	1,62	1,92	2,18	1,56	2,04	2,30		
Теплообменная поверхность термодинамического реактора F, м ²	70	119,8	183,5	59,8	96,7	190	56	110,8	176,8		
	Высота реактора H, м	1,375	2,35	3,6	1,175	1,9	3,725	1,1	2,075	3,475	

Примечание: газовая смесь в точке 1 содержит также воздух (2O₂ + 7,52 N₂); 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.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ И СЖИГАНИЕ ТОПЛИВА

Выводы

Проведены широкие численные исследования эффективности применения ТХР для дизельного двигателя мощностью 350 кВт, работающего на биогазе. Полученные результаты показывают, что этот метод позволяет существенно повысить КПД двигателя – на ~5,5% (абс.), или на 14% (отн.) на оптимальных режимах без реконструкции самого двигателя, что приведёт к значительному сокращению срока окупаемости перехода с природного газа на биогаз.

УДК 532.529: 662.62

Рохман Б. Б.¹, Кесова Л. А.², Шамис Л. Б.³

¹*Институт угольных энерготехнологий НАН и Минтопэнерго Украины*

²*Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”*

³*ОАО «Киевский институт «Энергопроект»*

МЕТОДИКА РАСЧЕТА И АНАЛИЗ АППАРАТОВ ДЛЯ ГАЗИФИКАЦИИ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В КИПЯЩЕМ СЛОЕ ПОД ДАВЛЕНИЕМ ЧАСТЬ 2. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТОПОК. НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ.

З використанням розробленої в [1] методики розрахунку проведені широкі чисельні дослідження впливу різних параметрів на процеси горіння й газифікації вугілля. Установлено, що розглянуті процеси недоцільно сполучати в одному реакторі, їх треба розділити: в одному апараті робити газифікацію, в іншому – горіння. У зв'язку із цим пропонується принципово нова технологічна схема газифікації твердого палива, що дозволяє автономно управляти зазначеними процесами, оптимізувати їх.

С использованием разработанной в [1] методики расчета проведены широкие численные исследования влияния различных параметров на процессы горения и газификации угля. Установлено, что рассматриваемые процессы нецелесообразно совмещать в одном реакторе, их надо разделять: в одном аппарате производить газификацию, в другом – горение. В связи с этим предлагается принципиально новая технологическая схема газификации твердого топлива, которая позволяет автономно управлять указанными процессами, оптимизировать их.

Using calculation procedure developed in [1], wide numerical researches on influence of various parameters of coal burning and gasification processes are carried out. It is established, that considered processes are inexpedient to combine in one reactor, they should be divided: one device for gasification, the other – for burning. In this connection essentially new technological schema of firm fuel gasification which allows to operate independently the specified processes, to optimize them is offered.

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, N 5. – P. 751 – 755.

Получено 10.11.2008 г.