

УДК 621.43.056

С.И. СЕРБИН, Н.А. ГОНЧАРОВА

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Украина

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЛАЗМЕННОЙ КИСЛОРОДНОЙ И КИСЛОРОДНО-ПАРОВОЙ ГАЗИФИКАЦИИ УГЛЕЙ

Статья посвящена вопросам моделирования процессов газификации низкосортных углей. Проведен ряд численных экспериментов, в результате которых определены основные параметры плазменной кислородной и кислородно-паровой газификации углей различного морфологического состава. По результатам расчетов определены теплотворные способности и количество массовых частей получаемого синтез-газа при газификации угля. Прогнозирование характеристик получаемого синтез-газа позволяет оценить дальнейшую возможность его использования в камерах сгорания газотурбинных двигателей.

Ключевые слова: плазменная газификация, газотурбинный двигатель, синтез-газ, численные методы, математическое моделирование.

Введение

Проблема изпользования высокозольных углей в энергетике для экономики Украины и других стран является весьма актуальной, особенно в свете возросших экологических требований к составу отходящих газов тепловых электростанций и других производств, где осуществляется сжигание и переработка угля.

Одним из вариантов решения этой проблемы является использование технологии предварительной газификации высокозольных углей и последующего сжигания получаемого синтез-газа в газотурбинной установке с выработкой электроэнергии при глубокой утилизации теплоты на основных стадиях технологического процесса. Оптимальная организация каждого из процессов позволяет повысить эффективность комплекса в целом.

В данной статье представлены результаты исследований и оптимизации процессов плазменной кислородной и кислородно-паровой газификации углей различного морфологического состава.

Анализ публикаций [1 – 3] показывает, что при газификации угля для получения синтез-газа с целью его дальнейшего применения в камерах сгорания газотурбинного двигателя (ГТД) нецелесообразно использовать воздушное дутье. Получаемый с его помощью синтез-газ имеет слишком низкую теплотворную способность для использования его в качестве топлива ГТД. Для повышения теплотворной способности синтез-газа необходимо использовать другие окислители, не имеющие в своем составе азота, в частности, кислород или смесь водяного пара с кислородом [4, 5].

Для обоснования возможности применения синтез-газа в камерах сгорания ГТД необходимо

знать значение его теплотворной способности, которое определяется по массовому составу синтез-газа, получаемого при газификации угля.

1. Постановка задачи

Для исследования процессов плазменной газификации высокозольных углей проведены численные эксперименты, в результате которых определены основные параметры кислородной и кислородно-паровой газификации, рациональные режимы газификации, качественный и количественный состав получаемого синтез-газа.

Исходными данными для расчетов являются: состав угля, режимные характеристики газификации, а также характеристики плазменного факела, используемого для активации угля в газификаторе.

Для термодинамического анализа процессов плазменной переработки углей используется универсальная программа расчета многокомпонентных гетерогенных систем TERRA, отработанная для высокотемпературных процессов [6]. В отличие от традиционных термохимических методов расчета равновесных состояний, использующих энергию Гиббса, константы равновесия и закон действующих масс Гольдберга и Вааге, алгоритм TERRA основан на принципе максимума энтропии для изолированных термодинамических систем, находящихся в состоянии равновесия.

Предполагаем, что на каждом шаге в реагирующей газовой смеси устанавливается состояние термодинамического равновесия. Этот подход справедлив, так как реакции выделения летучих углей протекают на порядки медленнее, чем реакции в газовой фазе между продуктами его деструкции. Это позволило отказаться от рассмотрения одновремен-

но протекающих сотен химических реакций, и резко сократить время вычислений, что в свою очередь дало возможность проведения параметрических расчетов, необходимых для проектирования конкретных устройств.

С помощью программы TERRA для угля с заданной зольностью и влажностью выполняется расчет его газификации с плазменной инициацией процесса. Все расчеты проведены применительно к 1 массовой части угля.

Рассмотрены следующие виды углей: уголь Майкубенского месторождения для коммунально-бытовых нужд (вариант 1) и энергетический экибастузский каменный уголь для коммунально-бытовых нужд (вариант 2).

Состав угля варианта 1 (по массе, %): C=58,446; H=3,695; N=1,5239; O=23,2881; S=1,477; Si=5,0577; Al=2,6292; Fe=1,0867; Ca=1,2037; Mg=0,577; Ti=0,1115; Na=0,2151; K=0,6419; P=0,0472. Зольность на сухую массу 23,5 %, влага 19,5 %. Высшая теплота сгорания 19133,76 кДж/кг.

Состав угля варианта 2 (по массе, %): C=50,84; H=3,1; N=0,93; O=25,6799; S=0,4317; Si=11,5458; Al=4,8268; Fe=1,4618; Ca=0,5432; Mg=0,1604; Ti=0,2050; Na=0,0987; K=0,1104; P=0,0663. Зольность на сухую массу 38,0 %, влага 5,0 %. Высшая теплота сгорания 18844,1 кДж/кг.

Во всех расчетах тепловая мощность плазменной струи принималась равной 50 кВт, что эквивалентно примерно 1 МВт тепловой мощности перерабатываемого угля. Начальная температура кислорода полагалась равной 300 К, водяного пара – 400 К, температура плазменной струи – 4500 К.

В расчетах варьировалось массовое содержание окислителя в диапазоне, соответствующем изменению коэффициента избытка окислителя α в смеси от 0,1 (переобогащенная углем смесь) до 1,0.

Исследовались процессы кислородной и кислородно-паровой газификации, при которой количество водяного пара, отнесенного к количеству смеси водяного пара и кислорода в системе составляет 20 %.

2. Результаты численных экспериментов

Проведено численное моделирование процессов газификации углей различного морфологического состава.

На рис. 1 показаны температуры процессов кислородной газификации углей. Температура возрастает до значения коэффициента избытка окислителя $\alpha=0,6$, и после этого стабилизируется. При коэффициентах избытка окислителя меньше 0,6 значения температур процессов для угля варианта 1 значи-

тельно ниже по сравнению с углем варианта 2, что объясняется его повышенной влажностью.

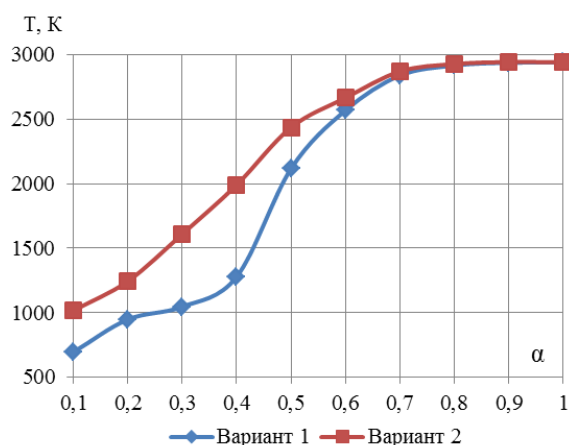


Рис. 1. Температура процессов кислородной газификации углей различного состава

На рис. 2 приведены графики зависимости температуры процессов от коэффициента избытка окислителя для кислородной и кислородно-паровой газификации угля варианта 2.

Разница температур процессов кислородной и кислородно-паровой газификацией составляет около 150-350 градусов.

Подвод водяного пара уменьшает температуру зоны окисления, и тем самым уменьшает вероятность плавления золы и снижает тепловые потери.

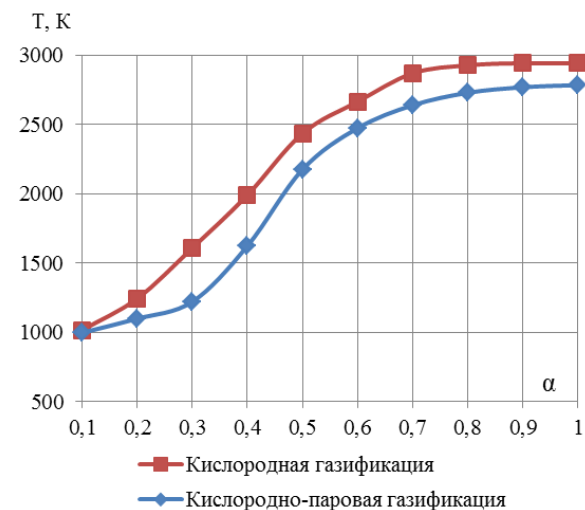


Рис. 2. Графики зависимости температур процессов кислородной и кислородно-паровой газификации угля варианта 2

Кроме того, применение кислородно-паровой технологии позволяет снизить количество кислорода, подаваемого в газификатор, в сравнении с чисто кислородной газификацией, что положительно влияет на экономические показатели установки.

Дополнительно также определены объемные доли компонентов и температура процесса газифи-

кации при разных соотношениях угольного сырья и окислителя.

В табл. 1, 2 представлены результаты расчетов процессов кислородной и кислородно-паровой газификации углей варианта 1 и 2 при давлении 0,1 МПа.

Данные представлены для значений коэффициента избытка окислителя α от 0,1 до 0,6.

Таблица 1
Результаты расчетов угля варианта 1

Кислородная газификация				
	Объемные доли			
	Температура, К	CO	H ₂	CH ₄
$\alpha=0,1$	694,2	0,0068	0,1234	0,1472
$\alpha=0,2$	947,2	0,3253	0,3362	0,0198
$\alpha=0,3$	1045,7	0,5765	0,2933	0,0052
$\alpha=0,4$	1278,1	0,6915	0,2504	0
$\alpha=0,5$	2116,7	0,6265	0,1550	0
$\alpha=0,6$	2569,1	0,5175	0,0794	0
Кислородно-паровая газификация				
$\alpha=0,1$	652,1	0,0025	0,0813	0,1643
$\alpha=0,2$	902,8	0,2103	0,3363	0,0343
$\alpha=0,3$	979,2	0,4121	0,3305	0,0132
$\alpha=0,4$	1029,5	0,5390	0,3074	0,0067
$\alpha=0,5$	1587,8	0,5245	0,2315	0
$\alpha=0,6$	2140,8	0,4705	0,1540	0

Таблица 2
Результаты расчетов угля варианта 2

Кислородная газификация				
	Объемные доли			
	Температура, К	CO	H ₂	CH ₄
$\alpha=0,1$	1016,2	0,3740	0,4814	0,0189
$\alpha=0,2$	1243,5	0,5992	0,3798	0,0017
$\alpha=0,3$	1609,1	0,6812	0,3091	0
$\alpha=0,4$	1990,9	0,7210	0,2525	0
$\alpha=0,5$	2436,3	0,6251	0,1413	0
$\alpha=0,6$	2665,4	0,4839	0,0649	0
Кислородно-паровая газификация				
$\alpha=0,1$	997,3	0,3387	0,4876	0,0236
$\alpha=0,2$	1098,1	0,5300	0,4088	0,0062
$\alpha=0,3$	1220,7	0,6222	0,3578	0,0018
$\alpha=0,4$	1623,2	0,6182	0,3055	0
$\alpha=0,5$	2175,9	0,5516	0,2153	0
$\alpha=0,6$	2474,1	0,4643	0,1349	0

При кислородной и кислородно-паровой газификации углей основными компонентами синтез-газ являются CO и H₂.

Основным параметром, который влияет на состав получаемого синтез-газа, является коэффициент избытка окислителя в газификаторе α . При этом

максимальное количество H₂ для угля варианта 1 достигается при коэффициенте избытка окислителя $\alpha = 0,2$ (объемная доля около 33,62 % и 33,63 % для кислородной и кислородно-паровой газификации соответственно), для угля варианта 2 – при $\alpha=0,1$ (объемная доля около 48,14 % и 48,76 % для кислородной и кислородно-паровой газификации). Это объясняется тем, что уголь варианта 1 имеет более высокую влажность и необходимы дополнительные тепловые затраты для его газификации.

С ростом α содержание водорода существенно снижается.

При кислородно-паровой газификации объемные концентрации водорода при коэффициенте избытка окислителя $\alpha=0,2-0,4$ больше на 3-5 % в сравнении с кислородной газификацией.

По результатам расчетов определены теплотворные способности ($Q_{\text{син.г.}}$) и количество массовых частей ($n_{\text{син.г.}}$) получаемого синтез-газа при газификации одной массовой части угля. Результаты расчетов представлены в табл. 3.

Таблица 3
Характеристики синтез-газа

	Вариант 1			
	Кислородная газификация		Кислородно-паровая газификация	
	$Q_{\text{син.г.}}$, кДж/кг	$n_{\text{син.г.}}$	$Q_{\text{син.г.}}$, кДж/кг	$n_{\text{син.г.}}$
$\alpha=0,1$	7170,8	0,9380	7410,2	0,7735
$\alpha=0,2$	9232,4	1,1110	8405,7	0,9270
$\alpha=0,3$	11339,6	1,2840	10141,9	1,0805
$\alpha=0,4$	11848,2	1,4570	11216,6	1,2340
$\alpha=0,5$	9028,7	1,6300	9377,1	1,3875
$\alpha=0,6$	6483,3	1,8030	7317,9	1,5410
	Вариант 2			
	Кислородная газификация		Кислородно-паровая газификация	
	$Q_{\text{син.г.}}$, кДж/кг	$n_{\text{син.г.}}$	$Q_{\text{син.г.}}$, кДж/кг	$n_{\text{син.г.}}$
$\alpha=0,1$	15287,3	0,9596	15172,8	0,7927
$\alpha=0,2$	14565,4	1,1543	14548,2	0,9654
$\alpha=0,3$	13448	1,3489	14148,1	1,1381
$\alpha=0,4$	12448,7	1,5435	12471,4	1,3108
$\alpha=0,5$	9054,6	1,7381	9640,6	1,4835
$\alpha=0,6$	6119,2	1,9328	7137,7	1,6561

Заключение

В результате численного эксперимента рассчитаны параметры кислородной и кислородно-паровой (массовая доля пара 20 %) газификации углей различного морфологического состава при различных коэффициентах избытка окислителя.

Рациональными для проведения процессов газификации являются значения коэффициента избытка окислителя 0,3 – 0,4, при которых количество горючих компонентов CO и H₂ максимально.

Для этих режимов возможно получить синтез-газ с теплотворной способностью порядка 10-14 кДж/кг.

При газификации углей с повышенной влажностью необходимы дополнительные тепловые затраты для испарения влаги и достижения температуры процесса, соответствующего выделению летучих.

В процессах плазменной кислородной газификации углей целесообразен дополнительный подвод водяного пара с целью снижения температуры в зоне частичного окисления, увеличения количества водорода в составе получаемого синтез-газа и увеличения экономичности установки, поскольку частичная замена кислорода на водяной пар незначительно влияет на теплотворную способность получаемого газа, а стоимость производства 1 кг водяного пара существенно дешевле стоимости получения кислорода.

Литература

1. *Энгельшт, В.С. Химическая термодинамика парокислородной газификации графита [Текст] / В.С. Энгельшт, Р.К. Балан // Теплофизика высоких температур. – 2011. – №5(49). – С. 763-770.*
2. *Хоффман, Е. Энерготехнологическое использование угля [Текст] / Е. Хоффман. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 328 с.*
3. *Газификация угля [Текст]: пер. с нем. / Г. Шиллинг, Б. Бонн, У. Краус, С.Р. Исламова. – М.: Недра, 1986. – 175 с.*
4. *Karpenko, E.I. Plasma-Fuel Systems for Enhancement Coal Gasification and Combustion [Text] / E.I. Karpenko, V.E. Messerle, A.B. Ustimenko // Presentations Abstracts of 30th Int. Symp. on Comb., July 25–30. – University of Illinois at Chicago, 2004. – P. 110.*
5. *Serbin, S.I. Theoretical investigations of the working processes in a plasma coal gasification system [Text] / S.I. Serbin, I. Matveev // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2010. – Vol. 38, Issue 12. – P. 3300-3305.*
6. *Трусов, Б.Г. Программная система TERRA для моделирования фазовых и химических равновесий [Текст] / Б.Г. Трусов // Тр. XIV Междунар. конф. по химической термодинамике. – 2002. – С. 483.*

Поступила в редакцию 23.05.2013, рассмотрена на редколлегии 13.06.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. Г.Ф. Романовский, Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, Украина.

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПЛАЗМОВОЇ КИСНЕВОЇ І КИСНЕВО-ПАРОВОЇ ГАЗИФІКАЦІЇ ВУГІЛЛЯ

С.І. Сербін, Н.О. Гончарова

Стаття присвячена питанням числового моделювання процесів газифікації низькосортного вугілля. В даній роботі проводиться ряд числових експериментів, в результаті яких визначені основні параметри плазмової кисневої і киснево-парової газифікації вугілля різного морфологічного складу. Прогнозування характеристик отриманого синтез-газу дозволяє визначити його подальшу можливість використання в камерах згоряння газотурбінних двигунів.

Ключові слова: плазмова газифікація, газотурбінний двигун, синтез-газ, числові методи, математичне моделювання.

THE NUMERICAL SIMULATION OF THE PLASMA COAL OXYGEN AND OXYGEN-STEAM GASIFICATION PROCESSES

S.I. Serbin, N.A. Goncharova

The article is devoted to the questions of the numerical simulation of low-grade coal gasification. The variant calculations are carried out and, as a result, basic characteristics of plasma oxygen and oxygen-steam coal gasification are predicted. The prediction of the synthesis gas characteristics is determined its continued ability to use in the combustion chambers of gas turbine engines.

Key words: combustor, gas turbine engine, synthesis gas, numerical methods, mathematical simulation.

Сербин Сергей Иванович – д-р техн. наук, проф., директор Машиностроительного института Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: siserbin@yandex.ru.

Гончарова Наталия Александровна – аспирант кафедры Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: natashka87-87@mail.ru.