УДК 662.764

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА РЕЖИМОВ ГАЗИФИКАЦИИ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

Пинчук В.А., Шарабура Т.А., Шевченко Г.Л.

Национальная Металлургическая Академия Украины, Днепропетровск, Украина

АННОТАЦИЯ

Для исследования основных закономерностей процесса газификации водоугольного топлива предложена равновесная термодинамическая модель расчета характеристик системы с нахождением состава и свойств продуктов реакций. Выполнено сравнение расчетно-теоретических показателей процесса газификации топлива и показателей работы опытно-промышленных установок, показана адекватность данной равновесной модели. Представлены результаты исследований процесса газификации водоугольного топлива при различных режимных параметрах процесса. Получены рациональные показатели воздушной и кислородной газификации водоугольного топлива.

ВВЕДЕНИЕ

Анализ ситуации, сложившейся в энергетической сфере, свидетельствует о том, что для решения энергетических проблем в Украине необходимо более широко использовать энергоресурсы, запасы которых имеются в стране в достаточном количестве. Украина располагает значительными запасами низкокалорийных углей [1, 2], широкое и эффективное применение которых позволит значительно расширить энергетическую базу страны. Сырьевая база низкокалорийного топлива также постоянно расширяется за счет отходов углеобогащения [3].

Перспективным направлением применения низкокалорийных энергоносителей как топлива, является получение на их основе высококонцентрированных суспензий, к которым относится водоугольное топливо [4,5]. Водоугольное топливо имеет свойства, позволяющие заменить им твердое, жидкое или газообразное топливо в различных топливопотребляющих агрегатах без существенной их реконструкции, а при необходимости возможно совместное использование водоугольного топлива и других видов топлива – мазута, угля, газа

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Одним из рациональных направлений использования водоугольного топлива является газификация. К преимуществам применения водоугольного топлива для газификации относится следующее: возможность использования низкосортных углей и углеотходов при изготовлении водоугольного топлива; взрыво- и пожаробезопасность на всех технологических стадиях приготовления и транспортировки; снижение вредных выбросов и запыленности атмосферы при использовании; простота подачи водоугольного топлива; снижение расхода окислителя в процессе газификации; рациональные пропорции угля и воды в составе топлива создают оптимальные условия для получения газа.

Газификация потока водоугольного топлива представляет собой сложный физико-химический процесс, протекающий, особенно на начальной стадии, в условиях резкой неизотермичности среды. Взаимодействие воды с углеродом топлива в этом процессе протекает через адсорбцию пара на угольной поверхности с образованием сложного комплекса, который затем разлагается с выделением в газовую фазу H_2, CO, C_xH_y [6].

Основными отличиями процесса воспламенения и газификации капли водоугольного топлива от газификации пылевидного твердого и распыленного жидкого топлива являются: низкотемпературная активизация реакционной поверхности топлива на стадии воспламенения [7], возрастание удельной реакционной поверхности в основной зоне процесса газификации [8] и интенсификация процесса газификации за счет реакции углерода топлива с водяным паром, протекающей параллельно основной реакции газификации

Реакционная поверхность капли топлива непосредственно перед воспламенением активизируется вследствие низкотемпературной отгонки водяным паром, образующимся при

испарении влаги топлива, газообразных инертных продуктов (типа CO_2, N_2 и др.), сорбированных ранее развитой угольной поверхностью, а также углеводородных компонентов топлива, имеющих сравнительно высокую температуру воспламенения.

Этот процесс, сопровождаемый резким увеличением удельной поверхности реагирования топлива и раскрытием активных центров, создает условия для протекания интенсивной реакции газификации при температурах меньше необходимых для воспламенения твердого сухого пылевидного топлива [9]. Например, как показали исследования температура воспламенения водоугольного топлива, полученного из газового угля, составляет 420 ^oC [10].

Для переработки водоугольного топлива предлагается использование технологии поточной автотермической газификации в закрученном потоке, что обеспечивает высокую интенсивность процесса и высокую степень конверсии углерода [2, 11]. Полнота проработки водоугольного топлива в процессе поточной газификации составляет 98,5-99,7 %, что значительно выше, чем при пылевидном сжигании угля (85-90 %). Реализацию процесса газификации водоугольного топлива предлагается осуществлять в двухкамерном циклонном газификаторе с горизонтальной осью цилиндрических камер [2, 11].

Для исследования основных закономерностей процесса газификации водоугольного топлива из низкосортных углей проведены исследования с использованием программного комплекса для термодинамического расчета равновесного состава и свойств многокомпонентных гетерогенных систем, основанного на фундаментальных законах термодинамики [12,13]. Предполагается, что в рассматриваемом процессе образуется условно замкнутая система, в которой установилось локальное фазовое и химическое равновесие. Правомерность использования термодинамически равновесного моделирования объясняется высоким уровнем концентрации энергии в рассматриваемых объемах, высокими скоростями протекания процессов превращения, мгновенно приводящими среду в состояние локального равновесия.

Для упрощения расчетной процедуры на первом этапе целесообразно вычислить состав исследуемого водоугольного топлива в моль/кг смеси и получить его брутто-формулу. Исходными данными являются состав и количество водоугольного топлива и окислителя, температура и давление процесса. В результате расчета определяется равновесный состав газа и твердой фазы и равновесные свойства системы (S, I, U, Cp и т.д.). Быстрота расчета позволяет решать многовариантные технологические задачи с варьированием параметров процесса газификации.

Для оценки прогностической способности модели были использованы результаты, полученные при высокотемпературной газификации водоугольного топлива на опытных и опытно-промышленных установках [14-16]. Сопоставление расчетно-теоретических и экспериментальных данных при высокотемпературной газификации водоугольного топлива представлено на рис.1.

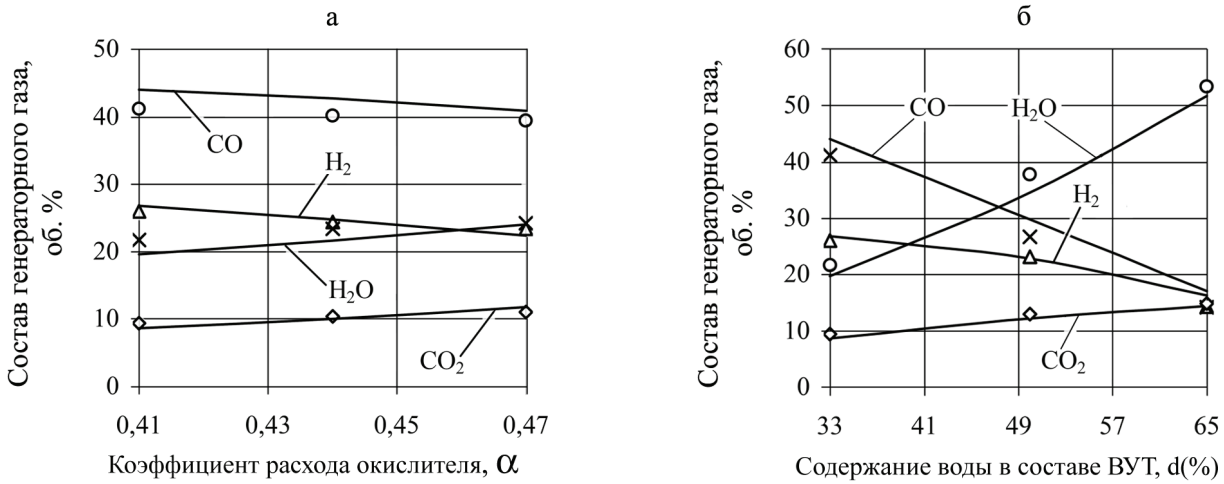


Рис.1 Зависимость состава генераторного газа при кислородной газификации водоугольного топлива

Также проведено сравнение расчетно-теоретических и экспериментальных данных процесса низкотемпературной газификации водоугольного топлива на воздушном и кислородном дутье [14-16]. Сопоставление расчетно-теоретических и экспериментальных данных при низкотемпературной газификации представлено в таблице 1.

Параметр	Воздушная газификация		Кислородная газификация	
	теоретические данные	экспериментальные данные	теоретические данные	экспериментальные данные
Степень конверсии углерода	~ 83 %		~ 91,5 %	
Состав газа, об. %				
CO	21,5	19,5	45,2	42,4
H_2	15,7	18,3	35,6	32,5
CO_2	5,9	6,8	7,1	8,2
H_2O	8,4	7,3	10,9	13,3
N_2	48,1	46,6	0,67	1,15
Прочие	0,4	1,5	0,7	1,5

Табл.1. Состав генераторного газа при низкотемпературной газификации водоугольного топлива

Сопоставление экспериментальных и расчетно-теоретических данных демонстрирует адекватность равновесной термодинамической модели. Расхождение теоретических данных с экспериментальными при расчетах высокотемпературной газификации в среднем составляет 5-6 %, в некоторых случаях до 9 %, при расчетах процесса низкотемпературной газификации расхождение теоретических данных с экспериментальными составляет 10-15 %. Равновесная термодинамическая модель обеспечивает достаточную для практических целей точность расчета процесса газификации водоугольного топлива.

Таким образом, использование термодинамической равновесной модели делает возможным проведение исследований газификации водоугольного топлива при различных режимных показателях процесса для разработки и выбора рациональных параметров.

С целью определения основных параметров процесса газификации проведены расчетно-теоретические исследования газификации водоугольного топлива, полученного из газового угля Донецкого бассейна (уголь 70 %, вода 29 %, реагент-пластификатор 1 %), на воздушном и кислородном дутье. Результаты исследований представлены в виде графических зависимостей на рис.2 и 3.

При газификации угля основными объемными реакциями являются горение окиси углерода и водорода, а также конверсия окиси углерода водяным паром. Окись углерода и водорода, участвующие в объемных реакциях, являются продуктами гетерогенных углеродных реакций. При увеличении температуры увеличивается константа скорости, а, следовательно, и степень превращения реагентов. При хорошем перемешивании реагентов основным фактором

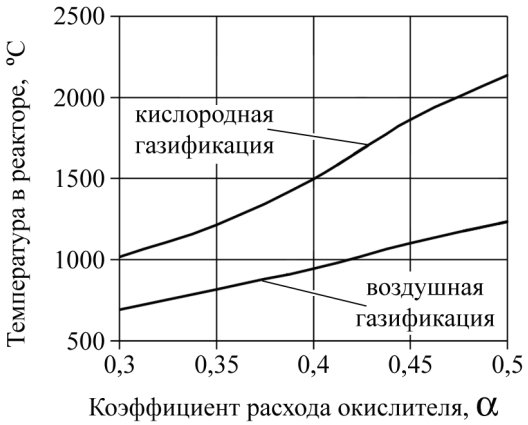


Рис.2 Равновесная температура в реакторе при воздушной и кислородной газификации водоугольного топлива

интенсификации объемных реакций является температура.

При газификации предпочтительными режимами являются такие, при которых весь углерод прореагировал с окислителем и продукты газификации находятся в равновесии с твердым углеродом (его количество в равновесии стремится к нулю, т. е. в равновесных условиях весь углерод должен быть превращен в газообразные продукты). При таких режимах газификации наблюдается

максимальное содержание восстановительных компонентов в газе, весь углерод прореагировал с окислителем, полученный газ окислен в минимальной степени. Как видно из полученных данных, достижение необходимого температурного уровня, связано с увеличением содержания окислительных компонентов в газе (до 30 %), что приводит к уменьшению теплотворной способности газа.

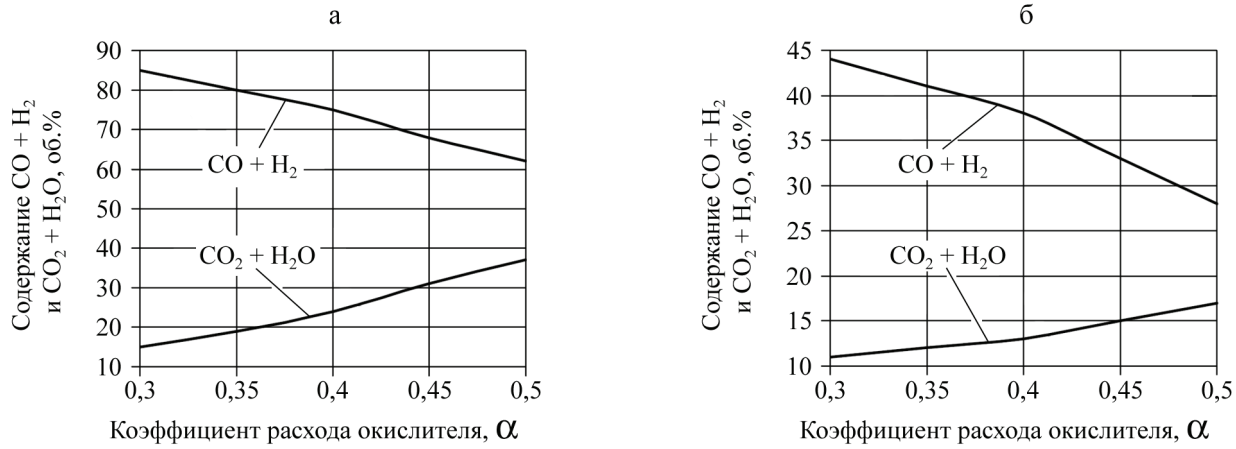
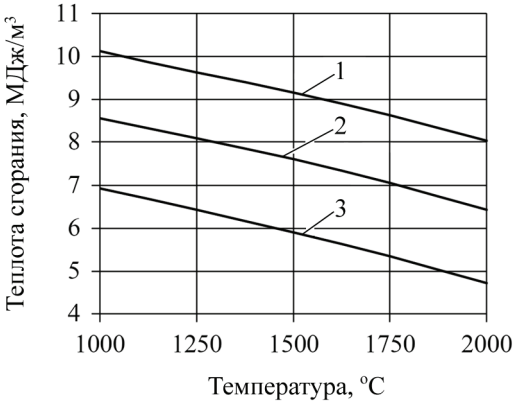


Рис.3 Содержание восстановительных и окислительных компонентов в генераторном газе при кислородной (а) и воздушной (б) газификации водоугольного топлива

Исследованиями было установлено, что границы стабильного содержания восстановительных компонентов в генераторном газе определяются рациональным коэффициентом расхода окислителя при воздушной и кислородной газификации исследуемого водоугольного топлива, который составляет 0,3 – 0,32. Однако, для таких значений коэффициента расхода окислителя равновесная температура в реакторе составляет 700-720 °С и 1000-1050 °С для воздушной и кислородной газификации соответственно. Поэтому, для обеспечения стабильного температурного режима и технологических параметров процесса необходимо осуществлять дополнительный подвод энергии, например, предварительный подогрев воздуха и водоугольного топлива [2,10].

Также важными параметрами при оценке полученного генераторного газа являются теплота сгорания и выход газа, которые определялись в указанном диапазоне температур процесса газификации и при различном содержания воды (d) в водоугольном топливе. Результаты исследований представлены на рис.4.

Зависимость теплоты сгорания газа от температуры процесса при воздушной газификации имеет аналогичный характер и в среднем теплота сгорания генераторного газа при воздушной газификации составляет 4-5 МДж/м^3. Как видно, с увеличением температурного режима на 100 °С происходит снижение теплоты сгорания газа на 6 %, а выход газа при этом практически не изменяется и составляет 1,5 – 1,7 м^3/кг$_{вут}$ в зависимости от влажности топлива. Таким образом, количественные и качественные различия в составе генераторного приводят к разной теплоте сгорания



1 - d = 30 %; 2 - d = 40 %; 3 - d = 50 %

Рис.4 Зависимость теплоты сгорания газа от температуры процесса при кислородной газификации

Анализ полученных расчетно-теоретических данных позволил определить рациональные показатели процесса газификации водоугольного топлива при различных видах окислителя. Результаты представлены в таблице 2.

Показатели	окислитель-воздух		окислитель-кислород
	без подогрева	с подогревом	
Температура в реакторе, ^oC	1050-1100		
Состав газа, об. %			
$CO+H_2$	32-34	42-43	82-83,6
CO_2+H_2O	14-15	9-10,5	15-15,5
N_2	50-51	46,5	0,4
Теплота сгорания газа, МДж/м^3	4-4,2	5-5,1	9,9
Выход газа, м^3/кг $_{ВУТ}$	3,4	3,12	1,7
Расход ВУТ, кг			
на 1 м^3 газа	0,29	0,32	0,59
на 1 ГДж газа	7,17	6,36	5,91
Расход окислителя, м^3			
на 1 кг ВУТ	2,19	1,83	0,35
на 1 м^3 газа	0,64	0,59	0,21
на 1 ГДж газа	15,7	11,6	2,08

Табл. 2. Рациональные показатели процесса газификации водоугольного топлива

Полученные результаты отражают основные показатели процесса автотермической газификации водоугольного топлива при различных видах окислителя. Установлено, что процесс газификации целесообразно проводить при подогреве воздуха до 400 – 600 ^oC и подогреве водоугольного топлива до 150 – 200 ^oC. При газификации водоугольного топлива получается газ с содержанием 33 – 83 % восстановительных компонентов, 14 – 15 % окислительных компонентов и теплотой сгорания 4 – 10 МДж/м^3 в зависимости от вида окислителя.

Таким образом, при газификации одного и того же водоугольного топлива в зависимости от параметров окислителя, количественного соотношения реагентов, параметров технологического режима возможно получение газов различного состава и тепловой ценности. Принимая в качестве основных управляющих параметров для достижения требуемого состава генераторного газа вид окислителя и температуру процесса, можно поддерживать такой коэффициент расхода окислителя, который устанавливает необходимое соотношение восстановительных и окислительных компонентов в газе, определяемое технологией его использования.

ВЫВОДЫ

- Одним из перспективных решений для угольной энергетики может стать переход от прямого сжигания низкосортного угля в различных топочных устройствах на приготовление из углей различных качеств, в том числе и из отходов углеобогащения, водоугольного топлива. Использование угля в виде водоугольного топлива для технологических и энергетических целей позволяет существенным образом улучшить теплотехнические и экологические показатели процесса термической переработки, так как технология производства водоугольного топлива позволяет получать топливо с заданными потребительскими свойствами.
- Для исследования основных закономерностей процесса газификации водоугольного топлива из низкосортных углей проведены расчетно-теоретические исследования с использованием программного комплекса для термодинамического расчета равновесного состава и свойств многокомпонентных гетерогенных систем. Сопоставление экспериментальных и расчетных данных демонстрирует адекватность данной модели. Модель обеспечивает достаточную для практических целей точность расчета процесса газификации угля. Расхождения расчетных данных с экспериментальными в по составу газа составляет 5 – 10, а в отдельных случаях до 15 % .

- Термодинамическая равновесная модель использована для расчетно-теоретических исследований газификации водоугольного топлива при различных режимных показателях процесса для разработки и выбора рациональных параметров. Как показали исследования, при воздушной газификации водоугольного топлива получается газ с содержанием 32 – 42 % $CO+H_2$ в, зависимости от параметров окислителя, и теплотой сгорания 4 – 5 МДж/м^3, а при кислородной газификации содержание $CO+H_2$ достигает 75 – 83 %, а теплота сгорания 9 – 10 МДж/м^3. Полученные результаты будут использоваться для дальнейших исследований и моделирования процесса газификации водоугольного топлива.
- Одним из управляющих параметров для достижения требуемых свойств водоугольного топлива и необходимого температурного уровня процесса термической переработки, является предварительный подогрев водоугольного топлива. Кроме того, при предварительном подогреве водоугольного топлива происходит деструкция органического вещества топлива с образованием промежуточных горючих соединений, что благоприятно влияет на последующие процессы термической переработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Потапов Б.Б., Пинчук В.А. Проблемы и перспективы использования в металлургии углей и продуктов их переработки //Інтегровані технології та енергозбереження. -2006.- №2.- С. 122 – 125.
2. Пинчук В.А., Губинский М.В., Потапов Б.Б. Использование водоугольного топлива и продуктов его переработки в энергетике и металлургии// Металургійна техніка: Збірка наукових праць Національної металургійної академії України.-Дніпропетровськ: «Нова ідеологія».-2008.-с. 221 – 227.
3. О.Д.Полулях. Технологічні регламенти вуглезбагачувальних фабрик: Довідково-інформаційний посібник // Дніпропетровськ. Національний гірничий університет. 2002. 856 с.
4. Н.Б.Урьев. Высококонцентрированные дисперсные системы // М. Химия. 1980. 360 с.
5. А.С.Макаров, А.И.Егурнов, С.Д.Борук. Высококонцентрированные суспензии на основе отходов углеобогащения. Получение, реологические характеристики и энергетическая ценность // Хімічна промисловість України. 2007. №2(79). С. 56 – 60.
6. З.В.Чуханов. Некоторые проблемы топлива и энергетики// М. АН СССР. 1961.
7. З.В.Смирнова, Г.Н.Делягин. О взаимодействии обводненного твердого топлива с кислородом / Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий// М. Наука. 1967. С. 68 – 77.
8. Г.Н.Делягин, Б.Н.Сметанников. Исследование процесса воспламенения капли водоугольной суспензии / Новые методы сжигания топлива и вопросы теории горения// М. Наука. 1965.
9. Г.Н.Делягин. Об условиях совместного протекания процессов испарения воды и выгорания капли водоугольной суспензии / Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий// М. Наука. 1967. С. 55 – 67.
10. Т.А.Шарабура, В.А.Пинчук, Г.Л.Шевченко. Влияние температуры подогрева водоугольного топлива на его свойства и состав // Металургійна теплотехніка: Збірка наукових праць Національної металургійної академії України. 2010. С.
11. Пинчук В.А., Потапов Б.Б., Шарабура Т.А. Особенности газификации водоугольного топлива в газификаторах циклонного типа//Інтегровані технології та енергозбереження. -2009.- №3.- С. 131 – 134.
12. Б.Г.Трусов. Метод и алгоритм расчета равновесного состава и свойств многокомпонентных гетерогенных систем // М. МГТУ. 2000. 27 с.
13. Г.Б.Синярев, Н.А.Ватолин, Б.Г.Трусов, Г.К.Моисеев. Применение ЭВМ для термодинамических расчетов металлургических процессов // М. Наука. 1982. 263с.
14. Е.Г.Горлов, В.Г.Андриенко, К.Е.Нефедов. Прямоточная газификация водоугольных суспензий с сухим шлакообразованием высокозольных углей // Химия твердого топлива. 2009. № 2. С. 37 – 42.
15. Д.А.Свищев, А.В.Кейко. Термодинамический анализ режимов газификации водоугольного топлива в потоке // Теплоэнергетика. 2010. № 2. С. 33 – 36.
16. Шиллинг Г.-Д., Бонн Б., Краус У. Газификация угля. Пер. с нем. С. Р. Исламова /Под ред. С. Р. Исламова.- М: Недра, 1986.-175 с.