

Компьютерное моделирование процесса газификации водоугольного топлива с использованием равновесной термодинамической модели

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 углей 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.

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, в условиях резкой неизотермичности среды, особенно на начальной стадии. 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 [6], возрастание удельной реакционной поверхности в основной зоне процесса газификации [7, 8] и интенсификация процесса газификации за счет реакции углерода топлива с водяным паром, протекающей параллельно основной реакции газификации.

Для переработки водоугольного топлива предлагается использование технологии поточной автотермической газификации в закрученном потоке, что обеспечивает высокую интенсивность процесса и высокую степень конверсии углерода [2, 9]. 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, 9].

В настоящее время для моделирования процессов в энергетике и металлургии используются методы термодинамических расчетов равновесного состояния, позволяющие определить термодинамические характеристики процесса и состав продуктов реакций. Эти методы часто применяют в исследовании различных углехимических процессов и технологий (газификация, горение, гидрогенизация, экология и т. д.).

Для описания термодинамического равновесия в настоящее время используются три группы методов:

- методы, основанные на законе действующих масс (уравнениях констант равновесия);

- методы, использующие понятия химического сродства и степени завершенности химических реакций;

- методы минимизации термодинамических потенциалов.

Методы третьей группы непосредственно используют свойство минимума энергии Гиббса dG в условиях равновесия.

Минимальность значения энергии Гиббса относительно давления p и температуры T следует из неравенства Клаузиуса

$$-dG + v \cdot dp - S \cdot dT \geq 0, \quad (1)$$

и, поскольку $G = f(p, T, n_i)$, то, решая задачу на условный экстремум, можно найти равновесные концентрации компонентов n_i и значения всех параметров системы.

Различие подходов к решению задач термодинамического равновесия не означает возможности получения отличающихся результатов. Все приведенные методы являются следствием второго закона термодинамики и закона сохранения энергии, распространенными на изолированные многокомпонентные системы, находящиеся в состоянии равновесия. Отличительными особенностями и преимуществами методов третьей группы являются: сокращение необходимой для расчета информации; возможность моделирования большого числа самых разнообразных состояний и процессов; высокая степень универсальности и единообразия получаемой системы уравнений, которая пригодна без всяких изменений к расчетам любых видов.

Принцип минимизации термодинамических потенциалов реализован в программном комплексе расчета равновесных состояний многофазных гетерогенных систем. В основу алгоритма программного комплекса, положен принцип максимума энтропии в предельно равновесном состоянии [10].

Установление фазового и химического равновесия в любой системе – реальный, необратимый процесс. Для него характерно возрастание энтропии, выражаемое в соответствии со вторым началом термодинамики соотношением

$$dS \geq \frac{\delta Q}{T}. \quad (2)$$

При установлении равновесия происходит выравнивание всех термодинамических параметров системы (температуры, давления, энтальпии и т. п.) по занимаемому объему.

Поскольку термодинамическое равновесие возможно только при отсутствии обмена массой и энергией между системой и окружающей средой, максимум энтропии должен быть обусловлен постоянством состава химических элементов и внутренней энергии в силу закона сохранения энергии

$$dU = \delta Q - \delta A = \delta Q - p \cdot dv. \quad (3)$$

Совмещая выражения (2) и (3), получим

$$T \cdot dS \geq dU + \delta A \text{ или } T \cdot dS - dU - p \cdot dv \geq 0. \quad (4)$$

В общем случае система состоит из нейтральных и электрически заряженных компонентов газовой фазы ($i=1, 2, \dots, k$) и отдельных конденсированных (твердых или жидких) фаз ($l=1, 2, \dots, L$), выраженных в молях на единицу массы n_i и n_l . Тогда энтропия такой системы равна

$$S = \sum_{i=1}^k S_i^{(p_i)} \cdot n_i + \sum_{l=1}^L S_l \cdot n_l = \sum_{i=1}^k (S_i^0 - R_0 \cdot \ln \frac{R_0 \cdot T \cdot n_i}{v}) \cdot n_i + \sum_{l=1}^L S_l^0 \cdot n_l \quad (5)$$

где $S_i^{(p_i)}$ - энтропия i -го компонента газовой фазы при том парциальном давлении $p_i = R_0 \cdot T \cdot n_i / v$, которой он будет иметь в равновесном состоянии; S_l - энтропия конденсированной фазы l , зависящей только от температуры; v - удельный объем всей системы; S_i^0 - стандартная энтропия i -го компонента газовой фазы при температуре T и давлении, равном 1 физической атмосфере.

Определение параметров равновесного состояния заключается в нахождении значений всех зависимых переменных, включая числа молей компонентов и фаз, при которых величина S достигает максимума.

При отыскании экстремума на величины искомым неизвестных накладываются следующие дополнительные связи, отражающие условия существования системы:

1. условие постоянства полной внутренней энергии при всех возможных химических превращениях, происходящих в связи с установлением равновесия;

2. условие материальной изолированности системы от окружающей среды (количество молей любого j -го химического элемента в исходном и конечном равновесном состоянии должно быть одинаковым);

3. условие электронейтральности системы в целом;

4. условие справедливости уравнения состояния идеального газа, отражающего связи между параметрами состояния системы и ее составом в рассматриваемом интервале параметров.

С математической точки зрения, отыскание максимума величины S (энтропии системы) сводится к решению задачи на условный экстремум. Для отыскания этого условного экстремума

используется метод Лагранжа, [11] в соответствии с которым составляется вспомогательная функция Лагранжа вида

$$\Lambda = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \sum_S \lambda_s \cdot \varphi_s(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (6)$$

где $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ - функция, для которой ищется условный экстремум (в данном случае это выражение для энтропии); φ_s - условия, ограничивающие область допустимых значений переменных; λ_s - неопределенные множители Лагранжа; s - число условий.

Произведя подстановки, получим выражения для функции Λ

$$\begin{aligned} \Lambda(p, T, n_i, n_l, \lambda_j, \lambda_e, \lambda_u, \lambda_p) = & \sum_{i=1}^k (S_i^0 - R_0 \cdot \ln \frac{R_0 \cdot T \cdot n_i}{v}) \cdot n_i + \sum_{l=1}^L S_l^0 \cdot n_l + \\ & + (U - \sum_{i=1}^{k+L} U_i \cdot n_i) \cdot \lambda_u + \sum_{j=1}^m (\sum_{i=1}^{k+L} a_{ji} \cdot n_i - b_j) \cdot \lambda_j + (\sum_{i=1}^k a_{ei} \cdot n_i) \cdot \lambda_e + \\ & + (p \cdot v - R_0 \cdot T \cdot \sum_{i=1}^k n_i) \cdot \lambda_p \end{aligned} \quad (7)$$

Для того, чтобы найти экстремум величины S , необходимо продифференцировать полученную функцию Λ по всем неизвестным переменным $p, T, n_i, n_l, \lambda_j, \lambda_e, \lambda_u, \lambda_p$ и найденные выражения приравнять нулю. Составленная таким образом система уравнений описывает связи, существующие в равновесии между параметрами состояния и составом рассматриваемой многокомпонентной системы.

Для определения искомым неизвестных используется метод последовательных приближений Ньютона, который заключается в линеаризации исходных уравнений и последующем решении полученной системы путем итераций. Для линеаризации нелинейные члены уравнений разлагаются в ряд Тейлора относительно начального приближения. При этом ограничиваются только членами первого порядка [11].

В результате расчетная система уравнений становится линейной и может быть решена методом Гаусса. Полученное решение не будет окончательным, поскольку оно найдено относительно какого-то произвольно выбранного начального

приближения для неизвестных, входящих в нелинейные члены. Для уточнения расчет повторяется с новым начальным приближением, равным результатам предыдущего шага, до тех пор, пока разница между двумя идущими подряд итерациями не станет меньше наперед заданной величины.

Представленный метод математического моделирования равновесного состава и свойств многокомпонентных гетерогенных систем позволяет производить термодинамические расчеты разнообразных химических и термических процессов с участием угля и продуктов его переработки. Поскольку в любом процессе соблюдается закон сохранения энергии при всех возможных химических превращениях, происходящих в связи с установлением равновесия, величина термодинамического потенциала (т.е. полной внутренней энергии) должна оставаться неизменной:

$$U = \int_{T_0}^T C_v \cdot dT + \Delta_f H^0(T_0), \quad (8)$$

Под полной внутренней энергией вещества подразумевается общий ее запас, который включает в себя тепловую составляющую энергии $\int_{T_0}^T C_v \cdot dT$ и химическую составляющую энергии $\Delta_f H^0(T_0)$.

Для тепловой составляющей полной внутренней энергии в качестве точки отсчета чаще всего принимается температура 0 К. Химической составляющей энергии является энтальпия образования вещества при стандартных условиях $\Delta_f H^0(298,15)$ и составляющая, зависящая от температуры $H(T) - H(298,15)$.

Существует два подхода к определению энтальпии образования угля и углесодержащих топлив:

- энтальпия образования определяется в виде суммы энтальпий образования элементов в стандартных состояниях [12, 13];

- энтальпия образования рассматривается как энергия, выделяющаяся или поглощающаяся при разложении органической массы угля [14].

Известно, что угли состоят из горючей части и балласта (влаги и золы) [15, 16]. При термической переработке углей происходит нагрев минеральной массы до высоких температур, в результате чего вещества минеральной массы претерпевают

превращения, включая процессы разложения и образования новых веществ при различных взаимодействиях. Характер процессов определяется свойствами среды, в которой реализуется процесс переработки, а также температурой.

Кроме того, уголь при переработке может использоваться как в рабочем состоянии, так и в подсушенном (т.е. с учетом только гигроскопической влаги), а также в виде водоугольной суспензии, что отражается на составе топлива и влияет на исходное состояние системы топливо-окислитель. Таким образом, состав угля и углесодержащих топлив при расчете представляют в виде химической брутто-формулы, например, в рабочем состоянии

$$C_k^p H_l^p O_m^p N_n^p S_\xi^p (H_2O)_\omega^p A_g^p, \quad (9)$$

где $k, l, m, n, \xi, \omega, \nu$ - числа молей соответствующих компонентов углерода С, водорода Н, кислорода О, азота N, серы S, влаги H_2O , золы А в 1 кг угля в рабочем состоянии, моль/кг.

При этом, например, процесс сжигания в воздухе описывается следующим уравнением

$$\begin{aligned} & \alpha_{сж} \nu_{сж} \cdot (O_2 + \beta N_2 + \gamma Ar + \chi H_2O) + C_k^p H_l^p O_m^p N_n^p S_\xi^p (H_2O)_\omega^p A_g^p = \\ & = kCO_2 + (l/2 + \omega + \alpha_{сж} \nu_{сж} \chi) H_2O + \xi SO_2 + (\alpha_{сж} - 1) \nu_{сж} O_2 + \\ & + (\alpha_{сж} \nu_{сж} \beta + n/2) N_2 + \alpha_{сж} \nu_{сж} \gamma Ar + A_g^p + Q_H^p, \end{aligned} \quad (10)$$

где $\nu_{сж}$ - число молей кислорода, необходимое для полного сжигания 1 кг угля с образованием основных компонентов, содержащих кислород CO_2, H_2O, SO_2 ; β, γ, χ - число молей азота, аргона и паров воды во влажном воздухе на моль кислорода; $\alpha_{сж}$ - коэффициент избытка окислителя; Q_H^p - низшая теплота сгорания угля, кДж/кг.

Аналогично можно описать процесс газификации. При этом коэффициент избытка окислителя будет меньше единицы и при нормальных условиях газ будет содержать CO, H_2, H_2S .

Уравнение можно записать в виде уравнения сохранения энтальпии

$$\begin{aligned} & \alpha_{\text{сж}} \nu_{\text{сж}} \cdot (I_{\text{O}_2} + \beta I_{\text{N}_2} + \gamma I_{\text{Ar}} + \chi I_{\text{H}_2\text{O}}) + \Delta_f H_{\text{угл}}^0(298,15) = \\ & = k I_{\text{CO}_2} + (l/2 + \omega + \alpha_{\text{сж}} \nu_{\text{сж}} \lambda) I_{\text{H}_2\text{O}} + \xi I_{\text{SO}_2} + (\alpha_{\text{сж}} - 1) I_{\text{O}_2} + \\ & + (\alpha_{\text{сж}} \nu_{\text{сж}} \beta + n/2) I_{\text{N}_2} + \alpha_{\text{сж}} \nu_{\text{сж}} \gamma I_{\text{Ar}} + g_{\text{A}_9}^{\text{p}} \Delta H_{\text{A}_9}^{\text{p}} + Q_{\text{H}}^{\text{p}} \end{aligned} \quad (11)$$

где I_i - энтальпия i -го вещества, кДж/моль, равная $I_i = H_i(T) - H_i(298,15) + \Delta_f H_i^0(298,15)$; $\Delta_f H_{\text{угл}}^0(298,15)$ - энтальпия образования угля, кДж/кг; $g_{\text{A}_9}^{\text{p}}$ - массовая доля золы в 1 кг угля; $\Delta H_{\text{fA}_9}^0(298,15)$ - суммарная энтальпия образования зольных компонентов угля, кДж/кг равная

$$\Delta H_{\text{fA}_9}^0(298,15) = \sum_{i=1}^n g_i \Delta H_{\text{f} 298,15 i}^0, \quad (12)$$

где g_i - массовая доля i -го компонента в 1 кг золы; $\Delta H_{\text{f} 298,15 i}^0$ - энтальпия образования i -го вещества золы, кДж/кг.

Для исследования основных закономерностей процесса газификации водоугольного топлива, полученного из низкосортных углей, проведены исследования с использованием программного комплекса для термодинамического расчета равновесного состава и свойств многокомпонентных гетерогенных систем, основанного на фундаментальных законах термодинамики [10,17]. 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.

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 , S_r 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 [7-9]. Сопоставление расчетно-теоретических и экспериментальных данных при высокотемпературной газификации водоугольного топлива представлено на рис. 1.

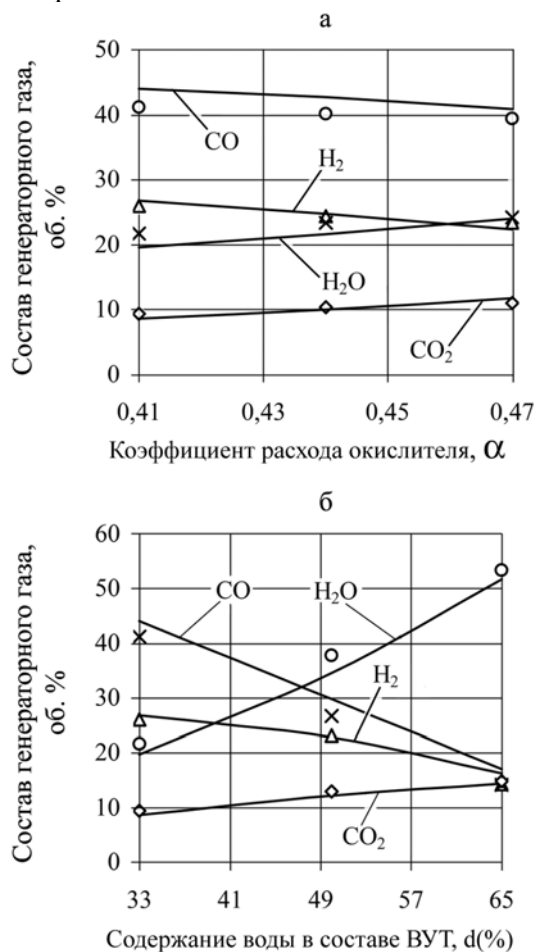


Рис. 1. Зависимость состава генераторного газа при кислородной газификации водоугольного топлива

Также проведено сравнение расчетно-теоретических и экспериментальных данных процесса низкотемпературной газификации водоугольного топлива на воздушном и кислородном дутье [18-20]. Сопоставление расчетно-теоретических и экспериментальных данных при низкотемпературной газификации представлено в таблице 1.

Таблица 1

Состав генераторного газа при низкотемпературной газификации водоугольного топлива

Параметр	Воздушная газификация		Кислородная газификация	
	расчетные данные	экспериментальные данные	расчетные 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 ₂ O	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

Сопоставление экспериментальных и расчетно-теоретических данных демонстрирует адекватность равновесной термодинамической модели. Расхождение 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.

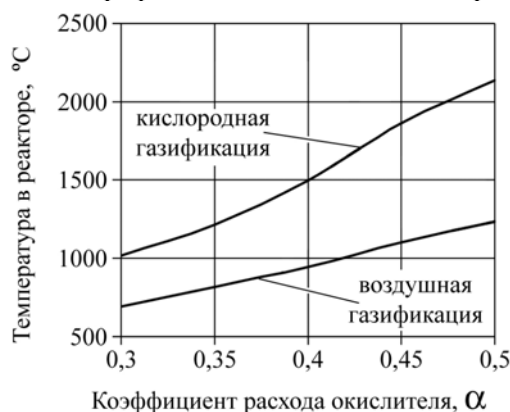


Рис.2. Равновесная температура в реакторе при воздушной и кислородной газификации водоугольного топлива

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

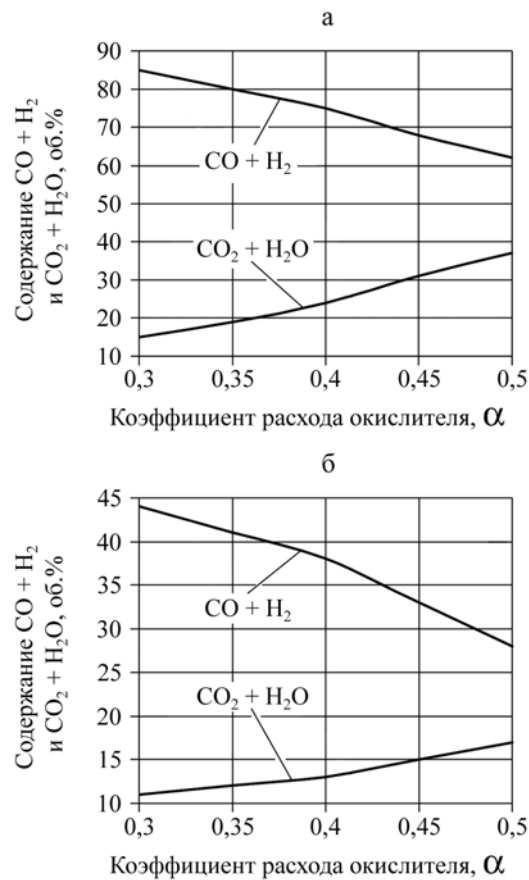
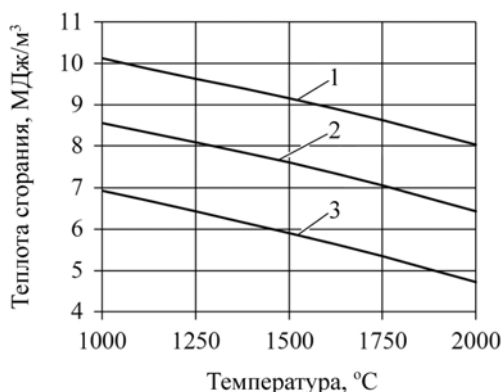


Рис.3. Содержание восстановительных и окислительных компонентов в генераторном газе при кислородной (а) и воздушной (б) газификации водоугольного топлива

Важными параметрами при оценке полученного генераторного газа являются теплота сгорания и выход газа,

которые определялись в указанном диапазоне температур процесса газификации и при различном содержании воды (d) в водоугольном топливе. Результаты исследований для кислородной газификации 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/м³. При этом 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 м³/кг_{вуг} 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

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 для воздушной и 1000-1050 °С для 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].

Предварительный подогрев водоугольного топлива обеспечивает не только дополнительный подвод энергии в топочное пространство, но является одним из управляющих параметров для достижения необходимых свойств водоугольного топлива. Кроме того, при предварительном подогреве водоугольного топлива происходит изменение структуры органического вещества топлива с образованием промежуточных горючих соединений, что благоприятно влияет на последующие процессы термической переработки [7].

Для определения влияния температуры подогрева водоугольного топлива на состав генераторного газа проведены расчетно - теоретические исследования процесса газификации. На рис. 5 представлена зависимость содержания восстановительных компонентов в генераторном газе при воздушной газификации от температуры подогрева топлива при коэффициенте расхода окислителя $\alpha = 0,3$. Зависимость содержания восстановительных компонентов в генераторном газе от температуры подогрева водоугольного топлива при кислородной газификации имеет аналогичный вид.

Из полученных данных видно, что с увеличением температуры топлива выход восстановительных компонентов возрастает. Однако при температурах выше $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ эффект от подогрева топлива значительно снижается, например, при подогреве водоугольного топлива от 150 до 200°C каждые 10°C дают прирост выхода восстановительных компонентов равный $0,097\%$, а при подогреве на следующие 50°C - $0,036\%$, что в $2,7$ раза меньше.

Также исследованиями установлено, что с увеличением коэффициента расхода окислителя влияние температуры подогрева водоугольного топлива на содержание восстановительных компонентов в генераторном газе уменьшается (рис. 6).

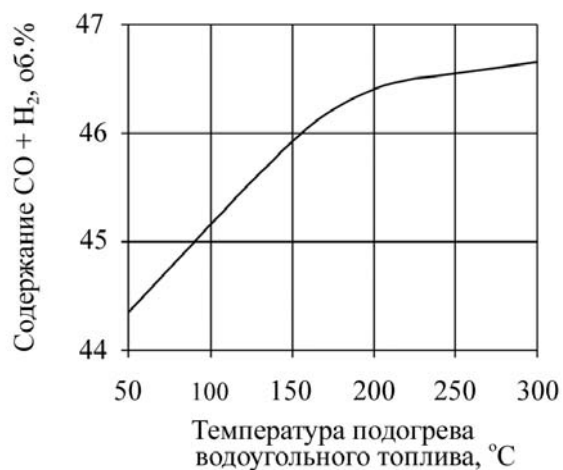


Рис.5. Зависимость содержания восстановительных компонентов в генераторном газе от температуры подогрева водоугольного топлива при воздушной газификации

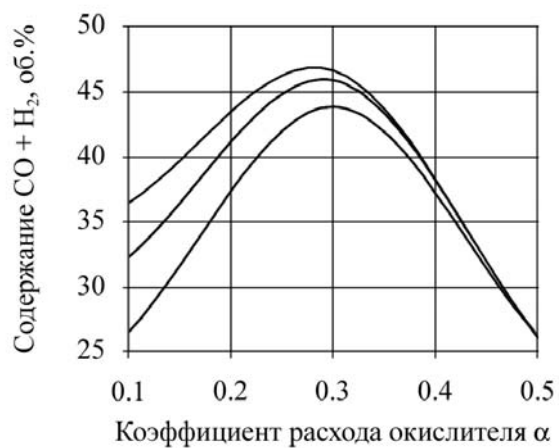


Рис.6. Влияние температуры подогрева водоугольного топлива на выход восстановительных компонентов генераторного газа при различных значениях коэффициента расхода окислителя

Подогрев воздуха обеспечивает поддержание заданного температурного уровня в зоне воспламенения в районе

расположения горелочных устройств и стабильность горения водоугольного топлива. При подогреве воздуха до 400 °С адиабатическая температура в топке увеличивается на 170 °С, а при подогреве воздуха до 600 °С адиабатическая температура в топке увеличивается на 260 °С.

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

Таблица 2

Рациональные показатели процесса газификации водоугольного топлива

Показатели	окислитель-воздух		окислитель-кислород
	без подогрева	с подогревом	
Температура в реакторе, °С	1050-1100		
Состав газа, об. %			
CO+H ₂	32-34	42-43	82-83,6
CO ₂ +H ₂ O	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

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 °С и подогреве водоугольного топлива до 150 – 200 °С.

При газификации водоугольного топлива получается газ с содержанием 33 – 83 % восстановительных компонентов, 14 – 15 % окислительных компонентов и теплотой сгорания 4 – 10 МДж/м³ 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.

Список источников

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. Полулях О.Д. 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.Смирнова, Г.Н.Делягин. О взаимодействии обводненного твердого топлива с кислородом / Сжигание

высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий// М. Наука. 1967. С. 68 – 77.

7. Г.Н.Делягин, Б.Н.Сметанников. Исследование процесса воспламенения капли водоугольной суспензии / Новые методы сжигания топлива и вопросы теории горения// М. Наука. 1965.

8. 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.

9. Пинчук В.А., Потапов Б.Б., Шарабура Т.А. Особенности газификации водоугольного топлива в газификаторах циклонного типа//Интегровані технології та енергозбереження. -2009.- №3.- С. 131 – 134.

10. Г.Б.Синярев, Н.А.Ватолин, Б.Г.Трусов, Г.К.Моисеев. Применение ЭВМ для термодинамических расчетов металлургических процессов // М. Наука. 1982. 263с.

11. Самарский А. А., Гулин А. В. Численные методы: Учеб. Пособие для вузов.-М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. Лит., 1989.-432 с.

12. Потапов Б.Б., Пинчук В.А. Оценка термодинамического потенциала углей Украины// Металлургическая теплотехника. Сборник научных трудов Национальной металлургической академии Украины.- Днепропетровск: «ПП Грек О.С.». – 2006.- С.278-284.

13. Пинчук В. А., Потапов Б. Б., Шарабура Т. А. Использование термодинамических показателей для оценки энергетической и технологической ценности различных марок углей// Металлургическая теплотехника. Сборник научных трудов Национальной металлургической академии Украины.- Днепропетровск: «ПП Грек О.С.».– 2008.-С.228-235.

14. Пинчук В.А., Губинский М.В.,Потапов Б.Б, Живолуп С.Г., Шарабура Т.А. Методологический подход к определению энтальпии образования угля // Металлургическая теплотехника. Сборник научных трудов Национальной металлургической академии Украины.- Днепропетровск: «Новая идеология».– 2009.- С.137-143.

15. Энергетическое топливо СССР (Ископаемые угли, горючие сланцы, торф, мазут и горючий природный газ)/ Справочник. В.С. Вдовченко, М.И. Мартынова, Н. В. Новицкий и др. -М.: Энергоатомиздат, 1991.-184 с.

16. Еремин И.В., Броневец Т.М. Марочный состав углей и их рациональное использование. –М.: Недра, 1994.-255 с.
17. Б.Г.Трусов. Метод и алгоритм расчета равновесного состава и свойств многокомпонентных гетерогенных систем // М. МГТУ. 2000. 27 с.
18. Е.Г.Горлов, В.Г.Андриенко, К.Е.Нефедов. Прямочная газификация водоугольных суспензий с сухим шлакообразованием высокочольных углей // Химия твердого топлива. 2009. № 2. С. 37 – 42.
19. Д.А.Свищев, А.В.Кейко. Термодинамический анализ режимов газификации водоугольного топлива в потоке // Теплоэнергетика. 2010. № 2. С. 33 – 36.
20. 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.