

ровать машину к условиям эксплуатации путём подбора её рациональных или оптимальных параметров.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. № 53632 UA, МПК<sup>8</sup> В 07 В 1/40 (2006.01). Вертикальний вібраційний грохот / Надутый В.П., Левченко П.В., Кіжло Л.А.; заявник і патентовласник ІГТМ НАНУ; Заявл. 26.04.2010; Опубл. 11.10.2010, Бюл. №19. – 3 с.
2. Надутый В.П. Определение целевых функций и варьируемых параметров процесса грохочения на вертикальном вибрационном грохоте/ В.П. Надутый, В.В. Сухарев, П.В. Левченко // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць ІГТМ НАН України. – Дніпропетровськ. – 2011. – Вип. 92. – С. 120–125.
3. Надутый В.П. Определение зависимости эффективности грохочения от конструктивных параметров вертикального вибрационного грохота/ В.П. Надутый, П.В. Левченко // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб.- 2011. – Вип. 45 (86). – С. 43–48.
4. Франчук В.П. Определение зависимости эффективности грохочения от режимных параметров вертикального вибрационного грохота/ В.П. Франчук, В.П. Надутый, П.В. Левченко// Вібрації в техніці та технології: Всеукр. наук.-техн. журнал. – Вінниця, 2011. – Вып. 2(62). – С. 73–76.
5. Надутый В.П. Результаты экспериментальных исследований зависимости производительности вертикального вибрационного грохота от его конструктивных параметров/ В.П. Надутый, П.В. Левченко// Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні: Укр. міжвід. наук.-техн. зб. держ. ун-ту "Львівська політехніка". – Львів. – 2011. – Вип. 45. – С.24–29.
6. Надутый В.П. Влияние свойств горной массы на производительность вертикального вибрационного грохота/ В.П. Надутый, П.В. Левченко, И.П. Хмеленко // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць ІГТМ НАН України. – Дніпропетровськ. – 2011. – Вип. 93. – С. 23-29.
7. Надутый В.П. Влияние характеристик горной массы на эффективность классификации вертикального вибрационного грохота/ В.П. Надутый, П.В. Левченко // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць ІГТМ НАН України. – Дніпропетровськ. – 2011. – Вип. 93. – С. 81–86.
8. Бююль А., Цефель П. SPSS: искусство обработки информации. Анализ статистических данных и восстановление скрытых закономерностей: Пер. с нем. – СПб.: ООО «Диа-СофтЮП», 2005. – 608 с.

**УДК [662.74:537]:62 – 9.001.24**

Кандидаты техн. наук Е.Ю. Пигида,  
Л.Т. Холявченко,  
инженеры С.Л. Давыдов, С.В. Демченко  
(ИГТМ НАН Украины)

#### **РАСЧЕТ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕАКЦИОННОЙ КАМЕРЫ ПЛАЗМО-ДУГОВОГО РЕАКТОРА ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ СРЕД**

Приводиться методика визначення основних конструктивних параметрів реакційної камери плазмо-дугового реактору для газифікації частинок вугілля у парах води. Для ілюстрації використання описаної методики наводиться приклад розрахунку при газифікації вугілля марки «А» із розміром частинок  $d_p \leq 0,1 \cdot 10^{-3}$  м.

#### **THE CALCULATION OF THE FORM FACTOR OF ARC PLASMA REACTION CHAMBER FOR CONVERCION OF CARBON-BEARING MEDIUM**

There is the method for determining the main design parameters of the reaction chamber of an arc plasma reactor for the gasification of coal particles in water vapor. For illustration the application of the described method is given the example of calculation for the gasification of brand "A" coal with a particle size  $d_p \leq 0.1 \cdot 10^{-3}$  m.

Основным элементом плазмо-дугового реактора для переработки углеродсодержащих сред является камера сгорания. В ней протекает сложный ком-

плекс процессов, которые должны быть организованы так, чтобы обеспечить максимальную полноту сгорания при заданном режиме работы реактора, быстрое выделение тепла в камере небольших размеров и веса, устойчивое протекание процессов, необходимое для надежной и безопасной работы реактора.

В зависимости от фазового состояния подаваемых в камеру сгорания компонентов топлива различают несколько схем организации рабочих процессов. По схеме «газ-жидкость» водяной пар и водоугольное топливо (ВУТ) подаются в камеру сгорания, где и должна произойти реакция между горючим и окислителем.

Здесь процесс газификации разделяется на два этапа. На первом этапе происходит диссоциация водяного пара, а также разложение твердого органического вещества с выделением летучих компонентов. В результате остается твердый пористый остаток, состоящий из углерода и некоторого количества неорганических веществ – золы. На втором этапе происходит газификация углеродного остатка, который включает в себя большую часть энергии угля.

При газификации углерода в парах воды осуществляются гетерогенные реакции углерода с водяным паром и двуокисью углерода, а также гомогенная обратимая реакция окиси углерода с водяным паром. Поэтому должны быть обеспечены условия, способствующие протеканию этих реакций.

Для устойчивого протекания процесса газификации нужно обеспечить равномерное распределение топлива по поперечному сечению камеры сгорания, а также выдержать заданное соотношение компонентов топлива, которое характеризуется коэффициентом избытка окислителя  $\alpha_T$  и может изменяться при работе плазмо-дугового реактора. Эти задачи выполняются в процессе впрыска и смешения компонентов (как в жидкой, так и в газообразной фазе).

Необходимым условием развития гомогенного и гетерогенного горения, обычно сопутствующих друг другу, является подвод тепла к компонентам топлива для их нагрева, испарения и воспламенения. В плазмо-дуговом реакторе это тепло выделяется при разряде электрической дуги, постоянно вращающейся в магнитном поле. Другой источник получения тепла - продукты горения, от которых тепло отдается жидким компонентам за счет теплопроводности и радиации, а также путем конвективного переноса тепла при диффузии конечных продуктов газификации.

Решающую роль в этом явлении играют так называемые «обратные токи». Они возникают в результате эжектирующего эффекта при впрыске топлива из форсунки и вращательного действия электрической дуги. Обратные токи приносят с собой продукты неполного сгорания с высокой температурой, тепло которых отдается распыленной жидкости.

Вследствие большой сложности описанного комплекса взаимосвязанных процессов затруднительно описать общую теорию, количественно оценивающую параметры отдельных процессов, которые зависят от конструктивного совершенства реакционной камеры плазмо-дугового реактора.

Выбор конструктивных и режимных параметров плазмо-дугового реактора в большой степени зависит от обобщенных характеристик процесса преобразования топлива в камере сгорания.

Наиболее распространенными обобщенными характеристиками процессов в камере сгорания являются следующие.

1. Время пребывания  $\tau_n$  компонентов топлива и его продуктов газификации в камере сгорания.

Эта величина определяется по формуле

$$\tau_n = \frac{V_k \cdot \rho_k}{m_\Gamma} = \frac{G_k}{m_\Gamma}, \quad (1)$$

где  $G_k$  - вес газа, находящегося в камере сгорания, кг;  $m_\Gamma$  - секундный расход газа, кг/с;  $V_k$  - объем камеры сгорания (определяется обычно как объем до критического сечения), м<sup>3</sup>;  $\rho_k$  - плотность газа в камере сгорания, кг/м<sup>3</sup>.

С учетом уравнения состояния газа  $P_k = (\rho RT)_k$  и формулы для расходного комплекса  $\beta = P_k F_{кр} / m_\Gamma$  можно получить

$$\tau_n = \frac{V_k \cdot \beta}{F_{кр} \cdot R_k \cdot T_k} \quad (2)$$

или

$$\tau_n = L_{np} \frac{\beta}{R_k \cdot T_k}, \quad (3)$$

где  $L_{np} = \frac{V_k}{F_{кр}}$  - приведенная длина камеры сгорания, м;  $P_k$  - давление газов в камере сгорания, Па;  $R_k$  - удельная газовая постоянная продуктов газификации, Дж/(кг·К);  $T_k$  - температура продуктов газификации, К.

2. Приведенная длина камеры сгорания.

Как видно из формулы (3), величина  $L_{np}$  пропорциональна времени пребывания газов в камере сгорания и в какой-то мере характеризует полноту сгорания топлива.

Величина  $L_{np}$  зависит от природы топлива и условий смесеобразования. Для схемы «газ - жидкость» величину  $L_{np}$  можно принимать 2,5 - 3,0 м [1].

3. Расходонапряженность камеры сгорания.

Расходонапряженностью называют секундный расход рабочего тела через единицу площади камеры сгорания. Ее определяют по формуле

$$m_F = \frac{m_\Gamma}{F_k} = \frac{P_k \cdot F_{кр}}{\beta \cdot F_k} = \frac{P_k}{\beta \cdot f_k}, \quad (4)$$

где  $F_k$  - площадь поперечного сечения камеры сгорания, м<sup>2</sup>;  $f_k$  - относительная площадь камеры сгорания.

Очевидно, что при увеличении  $P_k$  рабочий процесс в камере сгорания интенсифицируется. Поэтому при увеличении  $P_k$  через одну и ту же площадь камеры  $F_k$  можно подать большее количество топлива, т.е. увеличить значение  $m_F$ .

Отношение допустимой расходонапряженности камеры сгорания к давлению в ней можно приближенно считать постоянным и при расчетах газогенераторов, работающих на окислителе кислороде, пользоваться такими данными ( $m_F$ , кг/с·м<sup>2</sup>;  $P_k$ , Н/м<sup>2</sup>):  $m_F/P_k \cdot 10^4 = 1,1-1,3$  [1].

4. Объемная теплонапряженность камеры сгорания.

Величину ее определяют по формуле

$$Q_k = \frac{m_T \cdot H_u \cdot \varphi}{V_k}, \quad (5)$$

где  $H_u$  - теплотворность топлива, Дж/кг;  $\varphi$  - коэффициент полноты сгорания.

С учетом формулы для  $\beta$  выражение (5) нетрудно привести к виду

$$Q_k = \frac{H_u \cdot P_k}{\beta \cdot L_{np}}. \quad (6)$$

Как видно, при прочих равных условиях  $Q_k$  зависит от  $P_k$ .

Вместо  $Q_k$  можно использовать приведенную теплонапряженность, определяемую как:

$$Q_{k_{np}} = \frac{Q_k}{P_k}. \quad (7)$$

Используя выражение (3), формулу для  $Q_{k_{np}}$  можно записать так:

$$Q_{k_{np}} = \frac{H_u}{\tau_{II} \cdot R_k \cdot T_k}. \quad (8)$$

Обобщенные характеристики процессов преобразования топлива в камере сгорания  $\tau_{II}$ ,  $L_{np}$ ,  $m_F/P_k$ ,  $Q_{k_{np}}$  связаны между собой и необходимы для определения ее размеров. Однако ни одну из них не удастся надежно определить теоретическим путем. Поэтому эти формулы используются в большей степени для предварительных расчетов конструкции газогенератора, размеры и форма ка-

меры сгорания которого выбираются по конструктивным и технологическим соображениям.

Наиболее распространенной формой камеры сгорания является цилиндрическая. Одним из основных преимуществ ее является простота изготовления. Рассмотрим определение трех основных размеров – диаметра  $d_k$ , длины  $l_k$  и диаметра критического сечения  $d_{кр}$ .

При определении объема и диаметра камеры сгорания для заданных топлива и его расхода можно исходить или из удельной теплонапряженности, или из времени пребывания топлива и расходонапряженности камеры сгорания.

В первом случае объем камеры сгорания выражается формулой:

$$V_k = \frac{m_T \cdot H_u \cdot \varphi}{P_k}, \quad (9)$$

где  $m_T$  - секундный расход топлива, кг/с.

Для определения объема камеры по времени пребывания в ней топлива пользуются формулой:

$$V_k = \frac{\tau \cdot m_T \cdot R_k \cdot T_k}{P_k}. \quad (10)$$

Объем камеры сгорания определяется, исходя из требования обеспечить время пребывания, достаточное для достижения необходимой полноты сгорания. Оптимальное значение времени пребывания (или приведенной длины) зависит от рода топлива.

Объем и диаметр камеры сгорания определяется на основе двух характеристик – времени пребывания и расходонапряженности. Можно также использовать связь между  $\tau_{II}$  и приведенной длиной камеры сгорания  $L_{пр}$  (3).

На основе расчетов параметров процесса газификации ВУТ для заданного режима работы газогенератора определяются термодинамические характеристики газовой смеси: температура  $T_{см}$ ; удельная газовая постоянная  $R_{см}$ ; удельная теплоемкость при постоянном давлении  $(C_p)_{см}$ ; средний показатель изохоры  $n$ ; молекулярная масса  $\mu_{см}$ ; плотность смеси газов  $\rho_{см}$ ; коэффициент теплопроводности  $\lambda_{см}$ .

Тогда для вычисления значения  $\beta$  можно рекомендовать следующую формулу:

$$\beta = \frac{\sqrt{R_{см} \cdot T_{см}}}{A(n)}, \quad (11)$$

где

$$A(n) = \left( \frac{2}{n+1} \right)^{\frac{n+1}{2(n-1)}} \cdot \sqrt{n}. \quad (12)$$

Для определения времени пребывания компонентов топлива в камере сгорания воспользуемся формулой (3). Затем по известным значениям  $\beta$ ,  $m_{\Gamma}$  и  $P_{\kappa}$  определяется площадь критического сечения сопла по соотношению:

$$F_{\kappa p} = \frac{\beta \cdot m_{\Gamma}}{P_{\kappa}} \quad (13)$$

После определения  $F_{\kappa p}$  и выбора величины  $L_{np}$  для данного топлива найдем объем камеры сгорания, обеспечивающий необходимое время пребывания  $\tau_{\Pi}$ :

$$V_{\kappa} = L_{np} \cdot F_{\kappa p} \quad (14)$$

Достоверность принятого значения приведенной длины камеры сгорания проверяется по формулам (9) и (10).

Согласно выражению (4) относительную площадь камеры сгорания можно записать так:

$$f_{\kappa} = \frac{1}{\frac{m_{\Gamma}}{P_{\kappa}} \cdot \beta}. \quad (15)$$

Вычислив относительную площадь камеры сгорания  $f_{\kappa}$ , определим ее площадь поперечного сечения по соотношению:

$$F_{\kappa} = f_{\kappa} \cdot F_{\kappa p}. \quad (16)$$

Таким образом, определены диаметры камеры сгорания и критического сечения. Длину камеры сгорания легко определить по известным ее объему и площади поперечного сечения.

Для иллюстрации применения описанной методики приведены результаты расчета показателей процесса газификации угля марки «А» (термодинамические характеристики газовой смеси) и на их основе – геометрических параметров камеры сгорания плазмо-дугового реактора. Расчеты проведены для следующих исходных данных: расход угля (производительность)  $m_{\gamma}=100$  кг/ч; расход топлива (уголь + водяной пар)  $m_{\Gamma}=190$  кг/ч=0,053 кг/с; выход (расход) газов  $\sum V_i=2,744$  м<sup>3</sup>/кг или  $m_{\Gamma}=0,076$  м<sup>3</sup>/с=0,049 кг/с; давление газовой смеси в камере сгорания  $P_{\text{см}}=1,2 \cdot 10^5$  Па; температура газовой смеси  $T_{\text{см}}=2100$  К; теплонапря-

женность камеры сгорания  $Q_k=250$  МВт/м<sup>3</sup>; диаметр частиц угля  $d_u=0,1-0,2 \cdot 10^{-3}$  м; коэффициент избытка окислителя  $\alpha=0,45$ .

В результате расчетов процессов в камере определены термодинамические свойства газовой смеси: молекулярная масса  $\mu_{см} = 14,446$  кг/кмоль; плотность  $\rho_{см} = 0,645$  кг/м<sup>3</sup>; удельная газовая постоянная  $R_{см}=575,5$  Дж/(кг·К); удельная теплоемкость  $Ср_{см}=2,373$  кДж/(кг·К); динамическая вязкость  $\eta_{см}=62 \cdot 10^{-6}$  Н·с/м<sup>2</sup>; коэффициент теплопроводности  $\lambda_{см} = 0,213$  Вт/(м·К); средний показатель изоэнтропы  $n=1,32$ . С помощью этих величин по известным термогазодинамическим соотношениям определялись основные геометрические параметры камеры сгорания плазмо-дугового реактора.

Расчет выполнен для приведенной длины камеры  $L_{пр}=3,0$  и получены следующие значения основных геометрических параметров: диаметр камеры сгорания  $d_k=73 \cdot 10^{-3}$  м; диаметр критического сечения сопла  $d_{кр}=30 \cdot 10^{-3}$  м; длина  $l_k=0,47$  м; объем  $V_k=2 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>; время пребывания компонентов топлива в камере сгорания  $\tau_{п}=0,004$  с.

Полученные значения времени пребывания компонентов топлива сравнивались со значениями времени нагрева частицы угля до температуры воспламенения кокса  $T_n=1300$  К [2].

Время нагрева частицы угля до заданной температуры в зависимости от ее теплофизических свойств и плотности теплового потока (конвективная + лучистая составляющие) определяется выражением [3]:

$$\tau_n = \frac{(T_u - T_0) \cdot r_u \cdot \rho_u \cdot c_u}{6q_c} \quad (17)$$

где  $T_0, T_u$  - соответственно начальная и конечная температура нагрева частицы, К;  $r_u$  - радиус частицы, м;  $\rho_u$  - плотность угля, кг/м<sup>3</sup>;  $c_u$  - удельная теплоемкость угля, Дж/(кг·К);  $q_c$  - суммарный удельный тепловой поток, Вт/м<sup>2</sup>.

В результате расчетов установлено, что при плотности теплового потока в камере реактора  $q_c=10^7$  Вт/м<sup>2</sup> для частиц угля диаметром  $d_u \geq 0,1 \cdot 10^{-3}$  м время их нагрева до температуры воспламенения составляет  $\tau_n \geq 0,002$  с. Для более мелких частиц угля  $d_u < 0,1 \cdot 10^{-3}$  м время нагрева составляет  $\tau_n < 0,002$  с.

Следовательно, проектируемый плазмо-дуговой реактор для данного режима работы должен состоять только из основной камеры сгорания, в которой осуществляется процесс газификации ВУТ с частицами угля  $d_u \leq 0,1 \cdot 10^{-3}$  м.

При газификации ВУТ с  $d_u > 0,1 \cdot 10^{-3}$  м в конструкции реактора необходимо предусмотреть дополнительную камеру сгорания, в которой завершается процесс окисления компонентов топлива до заданной полноты сгорания.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алемасов, В.Е. Теория ракетных двигателей [Текст] / В.Е. Алемасов, А.Ф. Дрегалин, А.П. Тишин. – М.: Оборонгиз, 1963. – 495 с.
2. Теплотехника [Текст] / Под. ред. И.Н. Сушкина. - М.: Металлургия, 1973. - 479с.
3. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии [Текст] / А.Г. Касаткин.– М.: Химия, 1971. – 784 с.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОКСОВАНИЯ  
УГОЛЬНЫХ ШЛАМОВ**

Наведено результати термодинамічних розрахунків з аналітичного моделювання процесів спалювання вугільних шламів, проаналізовано динаміку виходу основних компонентів газу в режимі температур 200-2500 °С з метою виявлення можливості отримання додаткових енергоресурсів.

**MODELING OF COKING PROCESSES COAL SLACKS**

Results over of coal slacks incineration processes analytical modeling thermodynamics calculations are carry out, the dynamics of gas basic components exit is analyzed in the mode of temperatures 200-2500°C with the purpose of additional power resources receipt possibility exposure.

В Украине в угледобывающих регионах вокруг обогатительных фабрик сконцентрировано более 35 шламонакопителей, в которых накоплены жидкие отходы углеобогащения с более чем 130 млн. м<sup>3</sup> шламов. Площадь земель под ними – более 2,5 тыс. га, выведенных из оборота [1]. Подобные объекты являются, по своей сути, техногенными месторождениями с запасами углей, рассредоточенных в массе отходов, находящихся на поверхности и удобных для переработки.

Острая нехватка и поэтому высокая цена основных энергоносителей в Украине требует поиска альтернативных источников их получения, в том числе, путем переработки промышленных отходов, к которым относятся низкокачественные угли, угольные шламы и т.п.

ИГТМ НАН Украины в рамках госбюджетной темы исследовал возможность термопереработки углепородных шламовых смесей для получения энергетических газов и утилизации твердой составляющей в строительной отрасли. Энерготехнологический подход основан на особенности органической массы углей (ОМУ) при нагревании от 400 °С до 2500 °С разлагаться на твердые, жидкие и газообразные компоненты, в которые входят горючие вещества: углерод, водород, кислород, азот и сера в составе высокомолекулярных соединений. Летучие вещества при этом содержат испарившуюся влагу, жидкие продукты в парообразном виде и газообразные продукты разложения ОМУ. В нелетучем, твердом остатке сохраняются в несколько измененном виде все минеральные вещества, образующие золу. Поскольку выход летучих веществ из углей характеризует состав и степень углефикации его органического вещества, то в антрацитах выход летучих не превышает 8 % от сухой беззольной массы, в каменных углях – от 8 до 50 %, в бурых 45-60 % и сапропелитах – 80 % и более.

Одним из процессов термопереработки углей, освоенных в промышленном масштабе, является коксование, проходящее в установках без доступа кислорода с температурой нагрева до 1100° С с получением кокса, жидких смол и газов. Объемы выделения этих компонентов с ростом температуры увеличиваются, а кокса – снижаются.