



Методика расчета и исследование процесса газификации твердого топлива по смешанной схеме

Создана методика инженерного расчета процесса получения смешанного генераторного газа. Областью предполагаемого использования данной методики являются вопросы, связанные с предварительной расчетной проработкой данной технологии, получением значений базовых теплотехнологических параметров на стадии проектирования; созданием в рамках систем АСУ ТП реально действующих агрегатов компонентов прогнозного управления. Установлены основные характеристики процесса газификации по смешанной схеме твердого топлива с высоким выходом летучих в широком диапазоне изменения соотношения воздух-пар. Ил. 1. Табл. 1. Библиограф.: 6 назв.

Ключевые слова: *твердое топливо, генераторный газ, смешанная схема газификации, летучие соединения, зона газификации, теплота сгорания*

Method for engineering calculation of mix generator gas production process is created. Area of created method expected use are issues of beforehand calculative pre-working of the technology, obtaining of basic heat engineering parameters values on the stage of projecting, creating in ACS TP systems of real operating aggregates predictive control components. Main characteristics of solid fuel with significant volatile yield mixed gasification for wide range of air-steam ratio change in blowing are obtained.

Keywords: *solid fuel, generator gas, mixed gasification, volatile, gasification zone, heating value*

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами

Для украинской экономики важной научно-технической проблемой является как можно более широкое освоение использования отечественных твердых топлив в промышленном и коммунальном секторе и соответственно уменьшение доли импортного природного газа в топливных балансах. Однако на практике наиболее удобным для использования является газообразное топливо. Именно поэтому актуальным направлением является производство генераторных газов путем газификации твердых топлив.

Анализ публикаций по теме исследования

В основе газификации лежит неполное горение топлива (при недостатке кислорода) или реагирование углерода с углекислотой или водяным паром с целью получения горючих газов [1, 2].

В зависимости от состава дутья различают четыре вида процессов газификации и соответственно генераторных газов: воздушный, водяной, смешанный и парокислородный. Первые два способа практически не находят применения поскольку воздушный генераторный газ характеризуется крайне низкой теплотой сгорания (не более 5 МДж/м³), а технология получения водяного генераторного газа предполагает периодическое чередование фаз воздушного и водяного дутья, что крайне неудобно с технической точки зрения [3].

В теоретическом плане вопросы газификации твердого топлива проработаны достаточно глубоко, вплоть до дифференциального описания всех аспектов данных процессов [4]. Однако практиче-

ская реализация технологий газификации твердых топлив практически полностью прекратила свое существование в Советском Союзе после начала широкого освоения природного газа как основного вида топлива. В данный момент имеются сведения об испытаниях опытно-промышленных установок по газификации твердых топлив на украинских предприятиях [2]. Однако вплоть до настоящего времени генераторный газ не стал играть сколь-нибудь значительной роли в топливных балансах предприятий этих стран. В то же время из опыта работы иностранных предприятий известно, что генераторный газ может служить достаточно эффективным топливом в промышленном и коммунальном секторе, и технологии получения смешанного и парокислородного генераторных газов проработаны достаточно глубоко [1].

Решение задачи становления такого направления в отечественной промышленности как получение генераторных газов из твердых топлив только лишь за счет импортирования иностранных агрегатов и технологий представляется достаточно затруднительным в виду высоких (зачастую монопольных) цен, выставяемых иностранными компаниями.

Важной задачей в настоящее время является создание отечественных агрегатов и технологий газификации различных твердых топлив, а также методик для их расчета.

Известен ряд методик для расчета процессов, протекающих в зоне газификации [4, 5]. Однако значительная часть известных методик ориентирована на изучение процессов только лишь в зоне

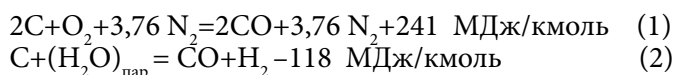
газификации и не учитывает процесс выделения летучих, а ряд методик основан на дифференциальном описании процессов газификации и потому их применение в практике инженерных расчетов довольно затруднительно. Идеальным случаем является создание методики, представленной набором аналитических расчетных зависимостей, реализация которой требует минимальных вычислительных ресурсов, но при этом необходимо гарантировать достаточный уровень точности расчетов.

Постановка проблемы исследования

Целью данной работы является создание методики инженерного расчета процесса получения смешанного генераторного газа, как технологии нацеленной на удовлетворение нужд малой энергетики и небольших промышленных предприятий, и исследование основных теплотехнических характеристик газификации угля с высоким выходом летучих по такой схеме.

Изложение материала и результаты

Основы технологии получения смешанного генераторного газа. В данном технологическом процессе в качестве дутья используются воздух и водяной пар. При этом расход воздуха находится в пределах 1,4-2,8 м³/кг угля, а пара – 0,2-0,5 кг/кг угля [3]. Выбор конкретных значений долей компонентов окислительной смеси зависит от состава угля, требуемой температуры газа на выходе установки, теплотеперь газогенератора и других технологических и конструктивных параметров. Причем большим удельным расходам воздуха соответствуют меньшие удельные расходы пара и наоборот. С точки зрения химии процесса итоговые реакции окисления углерода кислородом воздуха и водяным паром записываются как:



Из теории процессов газификации известно, что теплота сгорания идеального смешанного газа (процесс в котором эндотермические эффекты реакций (1) и (2) равны по абсолютной величине) составляет 7,5 МДж/м³.

Практическая методика для расчета процесса получения смешанного генераторного газа

1. Первым этапом расчета является приведения состава топлива к рабочему составу (как правило, в сертификатах на твердое топливо приводится состав его органической массы, содержание сухой золы и рабочей влаги). Для этой цели используется стандартный набор зависимостей [3].

2. На втором этапе определяется количество и состав летучих газов, выделяющихся из твердого топлива при его прогреве. Согласно работе [4] принимаем, что летучие газы представлены следующими соединениями: H₂S, CH₄, N₂, CO₂, H₂O. Их выход (м³/кг) можно вычислить при помощи следующих зависимостей:

$$V_{H_2S}^L = 0.007 \cdot k_s \cdot S^P$$

$$V_{CH_4}^L = 0.056 \cdot H^P - 0.0035 \cdot k_s \cdot S^P$$

$$V_{N_2}^L = 0.008 \cdot N^P$$

$$V_{CO_2}^L = 0.007 \cdot O^P$$

$$V_{H_2O}^L = 0.0124 \cdot W^P$$

где k_s – коэффициент, который характеризует распределение серы между соединениями. Принимается равным 0,1-0,5.

Суммарный выход летучих соединений на один килограмм топлива составляет:

$$V_L = V_{H_2S}^L + V_{CH_4}^L + V_{N_2}^L + V_{CO_2}^L + V_{H_2O}^L$$

Доля нелетучего углерода, который остается после выделения летучих, определяется как [4]:

$$C_{nr} = C^P - 0.375 \cdot O^P - 3 \cdot H^P - 0.1875 \cdot k_s \cdot S^P \quad (3)$$

3. Третий этап расчета состоит в построении материального баланса зоны газификации. Интегральную характеристику этого процесса можно предоставить с помощью следующего итогового химического уравнения:

$$C + x \cdot O_2 + x \cdot \left(\frac{1-k}{k}\right) \cdot N_2 + y \cdot H_2O = a \cdot CO + b \cdot H_2 + c \cdot CO_2 + d \cdot H_2O + x \cdot \left(\frac{1-k}{k}\right) \cdot N_2, \quad (4)$$

где x, y – расходные коэффициенты по кислороду и водяному пару на газификацию 1 кмоль углерода, кмоль/кмоль;

k – степень обогащения воздушной части дутья кислородом;

a, b, c, d – выход соответствующих газов при газификации, кмоль/кмоль углерода.

Величины x, y, k, характеризующие дутье, задаются в качестве исходных данных, а a, b, c, d – являются искомыми.

Для решения поставленной задачи составляется следующая система уравнений:

1. a + c = 1;
2. a + 2 · c + d = 2 · x + y;
3. b + d = y;
4. c · b / (a · d) = K_{p1}.

где уравнения (1), (2), (3) – являются балансовыми уравнениями по C, O, H соответственно; уравнение (4) – выражение константы равновесия для реакции водного газа CO + H₂O = CO₂ + H₂.

Решив приведенную выше систему уравнений,

определяем объемный состав продуктов газификации, их теплоту сгорания, выход газов с 1 кг угля, расходные коэффициенты по пару и сжатому воздуху.

Для определения значений константы равновесия реакции водяного газа в зависимости от температуры использована зависимость:

$$\lg K_p = 2162/T - 2,20,$$

рекомендованная в работе [6].

Решив указанную систему уравнений, получаем сведения о составе газа, который образуется в зоне газификации и его выход:

$$\%CO = a / V_{ГГ}^{уд} \cdot 100; \quad \%H_2 = b / V_{ГГ}^{уд} \cdot 100;$$

$$\%CO_2 = c / V_{ГГ}^{уд} \cdot 100$$

$$\%H_2O = d / V_{ГГ}^{уд} \cdot 100;$$

$$\%N_2 = x \cdot \frac{1-k}{k} / V_{ГГ}^{уд} \cdot 100,$$

где $V_{ГГ}^{уд} = a + b + c + d + x \cdot (1 - k) / k$ – удельный выход генераторного газа в зоне газификации с 1 кмоль углерода, м³/кмоль

Материальный баланс зоны газификации составляется относительно коксового остатка угля, который был получено от 1 кг твердого топлива. Полагаем коксовый остаток состоящим только из углерода и золы. Тогда коксовый остаток, соответствующий 1 кг сырого угля, поступившего в установку, содержит

$$\frac{C_{nr}}{100} \text{ кг углерода и } \frac{A^p}{100} \text{ кг золы.}$$

Исходя из записанного химического уравнения для газификации коксового остатка необходимо кислорода

$$V_{O_2} = x \cdot \frac{C_{nr} \cdot 22,4}{100 \cdot 12} \text{ м}^3,$$

или воздуха $V_{воз} = \frac{100}{k} \cdot V_{O_2}$.

Необходимый массовый расход пара определяется

как $G_{пара} = y \cdot \frac{C_{nr} \cdot 22,4}{100 \cdot 12} \cdot 0,8$.

Суммарный выход газов в зоне газификации составит:

$$V_{газ} = V_{ГГ}^{уд} \cdot \frac{22,4}{12} \cdot \frac{C_{nr}}{100}$$

Плотность генераторного газа из зоны газификации $P_{газ}$ определяем с учетом его состава. Объем

конкретных компонентов газа из зоны газификации ($V_{CO}^{газ}$, $V_{H_2}^{газ}$ и т. д.) определяется в зависимости от суммарного выхода газов в данной зоне и процентного содержания изучаемых компонентов.

4. Четвертый этап предполагает построение общего материального баланса газогенераторной установки (таблица).

Таблица. Общий материальный баланс газогенераторной установки

Приходная часть	Масса, кг	Расходящаяся часть	Масса, кг
Уголь	1	Газы: Из зоны газификации	$V_{газ} \cdot P_{газ}$
Воздух	$V_{воз} \cdot \rho_{воз}$	Из зоны возгонки летучих	$V_{л} \cdot P_{л}$
Водяной пар	$G_{пар}$	Шлаки	$A_p / 100$
Вместе	$M_{пр}$	Вместе	$M_{расх}$

В конце расчета выполняется анализ соответствия итоговых масс приходной и расходной частей. Еще одна проверка точности выполненных расчетов заключается в том, что должно выполняться соотношение:

$$V_{газ} \cdot \rho_{газ} + V_{л} \cdot \rho_{л} = V_{\Sigma} \cdot \rho_{\Sigma},$$

где $V_{\Sigma} = V_{газ} + V_{л}$ – общий расход газов, полученных в результате переработки 1 кг угля в газогенераторе, м³; ρ_{Σ} – плотность газа итогового состава удаляемого из газогенератора, кг/м³.

Объем компонентов в газе итогового состава определяется на основании следующих зависимостей:

$$V_{CH_4} = V_{CH_4}^л; \quad V_{CO_2} = V_{CO_2}^{газ} + V_{CO_2}^л; \quad V_{H_2S} = V_{H_2S}^л; \quad V_{H_2} = V_{H_2}^{газ}$$

$$V_{N_2} = V_{N_2}^л + V_{N_2}^{газ}; \quad V_{H_2O} = V_{H_2O}^{газ} + V_{H_2O}^л; \quad V_{CO} = V_{CO}^{газ}.$$

5. Пятый этап предполагает построение теплового баланса газогенераторной установки.

Идея теплового баланса заключается в том, что количество энергии, которая поступает в любую систему, равняется количеству энергии, которая используется и распределяется в этой системе.

Приходная часть теплового баланса

При производстве смешанного генераторного газа энергия поступает в газогенератор с химической энергией угля, физическим теплом угля, физическим теплом пара и воздуха. Также как и в случае рассмотрения материального баланса, тепловой баланс газогенератора строится для 1 кг твердого топлива, поступающего в газогенератор. Далее при использовании единиц измерения кДж/кг имеется в виду, что речь идет о количестве тепла, отнесенном к 1 кг твердого топлива.

Химическая энергия угля, кДж/кг

$$Q_{уг}^{хим} = 339 \cdot C^P + 1030 \cdot H^P - 109(O^P - S^P) - 25 \cdot W^P$$

Физическое тепло угля, который поступает в установку, кДж/кг

$$Q_{уг}^{физ} = c_{уг} \cdot t_{уг}$$

где $t_{уг}$ – температура угля, который поступает в газогенератор, °С; $C_{уг}$ – теплоемкость угля при температуре $t_{уг}$, кДж/(кг·К)

Физическое тепло воздуха

$$Q_{воз}^{физ} = V_{воз} \cdot c_{воз} \cdot t_{воз}$$

где $t_{воз}$ – температура воздуха, который попадает в газогенератор, °С; $C_{воз}$ – теплоемкость воздуха при температуре $t_{воз}$, кДж/(м³·К).

Физическое тепло водяного пара

$$Q_{пар}^{физ} = G_{пар} \cdot i_{пар}$$

где $i_{пар}$ – удельная энтальпия пара, который подается в газогенератор, кДж/кг.

Расходная часть теплового баланса

Энергия удаляется из газогенератора в виде химической энергии генераторного газа, физического тепла генераторного газа, физического тепла шлаков и теплопотерь газогенераторной установки.

Химическая энергия генераторного газа, кДж/кг

$$Q_{газ}^{хим} = (127 \cdot CO + 108 \cdot H_2 + 358 \cdot CH_4 + 234 \cdot H_2S) \cdot V_{\Sigma}$$

где CO, H₂, CH₄, H₂S – содержимое соответствующих компонентов в конечном составе генераторного газа %.

Физическая энергия генераторного газа, кДж/кг

$$Q_{газ}^{физ} = V_{\Sigma} \cdot c_{\Sigma}^t \cdot t_{\Sigma}$$

где t_{Σ} – температура газа, который покидает установку, °С; c_{Σ}^t – теплоемкость генераторного газа при температуре t_{Σ} , кДж/(м³·К).

Физическое тепло шлаков, кДж/кг

$$Q_{шлак}^{физ} = A^P / 100 \cdot c_{шлак} \cdot t_{шлак}$$

где $t_{шлак}$ – температура шлаков, который удаляется из газогенератора, °С; $C_{шлак}$ – теплоемкость шлаков при температуре $t_{шлак}$, кДж/(кг·К).

Поскольку суммарная энергия приходной и расходной частей равны между собой, то концепцию теплового баланса в большинстве случаев используют для определения температуры генераторного газа, который покидает установку.

Для этого выводим следующую зависимость:

$$t_{\Sigma} = \frac{Q_{уг}^{хим} + Q_{уг}^{физ} + Q_{воз}^{физ} + Q_{пар}^{физ} - Q_{газ}^{хим} - Q_{шлак}^{физ} - Q_{пот}^{гг}}{V_{\Sigma} \cdot c_{\Sigma}} \quad (5)$$

Расчеты при помощи этой зависимости носят итерационный характер, т. е. сначала задаемся температурой генераторного газа, рассчитываем его теплоемкость соответствующую заданной температуре. Далее рассчитываем температуру газа по формуле (5) и сравниваем полученное значение с принятым. В случае совпадения с ошибкой, которая не превышает 5 °С считаем решение завершенным. Если же ошибка превышает 5 °С, повторяем итерационную процедуру до достижения заданной точности расчета.

Таким образом, предложенный метод инженерного расчета достаточно прост в реализации и позволяет получить значения всех параметров, необходимых для предпроектной и проектной проработок газогенераторных установок, предназначенных для производства смешанного генераторного газа; а также может служить основой для создания компонентов прогнозного управления в рамках систем АСУ ТП агрегатов, реализующих данную технологию.

Исследование процесса получения смешанного генераторного газа

Теплотехнические характеристики газификации твердого топлива со значительным выходом летучих по смешанной схеме определены при помощи созданной методики в зависимости от соотношения воздух-пар в дутье. Для исследования приняты следующие исходные данные:

- состав угля, %: C_г = 82,5; H_г = 6,2; O_г = 7,8; N_г = 2,9; S_г = 0,6; A^c = 12; W^p = 7;
- температура воздушного дутья 20 °С.
- энтальпия пара 3000 кДж/кг;
- температура удаляемого из установки шлака 300 °С.

–теплопотери установки приняты равными нулю.

При этом для каждого исследованного сочетания воздух-пар, соотношение 2х+у на основании опыта расчета процессов газификации поддерживается равным 1,05. Рассмотрено пять сочетаний воздух-пар: 1,33 м³/кг – 0,34 кг/кг; 1,44 м³/кг – 0,3 кг/кг; 1,55 м³/кг – 0,26 кг/кг; 1,66 м³/кг – 0,22 кг/кг; 1,77 м³/кг – 0,19 кг/кг. В качестве основных характеристик процесса газификации определялись: состав газа, выход генераторного газа с единицы твердого топлива, температура газа, покидающего установку и теплота сгорания газа. На рисунке представлены определенные при помощи созданной методики характеристики газификации при этом по оси абсцисс для простоты откладывался только удельный расход воздуха.

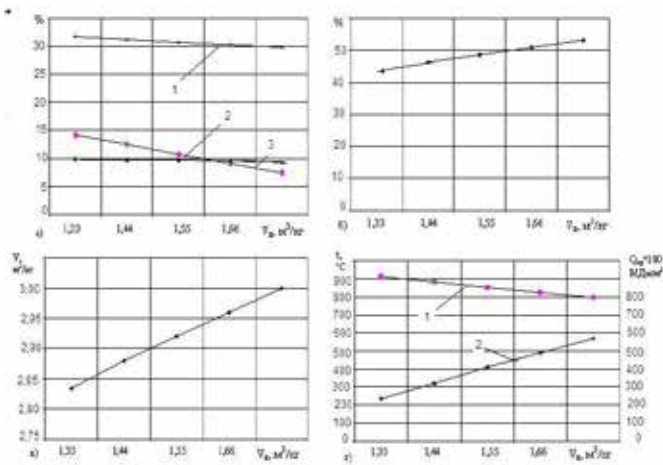


Рисунок. Характеристики процесса получения смешанного генераторного газа из угля с высоки выходом летучих в зависимости от удельного расхода воздуха: а) содержание горючих компонентов (1 – CO, 2 – H₂, 3 – CH₄) в итоговом составе генераторного газа; б) содержание балластных компонентов в итоговом составе генераторного газа; в) удельный выход генераторного газа с единицы топлива; г) теплотехнические характеристик процесса: 1 – теплота сгорания полученного газа, 2 – температура газа, покидающего установку

Из анализа данных, представленных на рисунке можно заключить, что как и при газификации коксового остатка или антрацитов [2] увеличение доли воздуха в дутье приводит при газификации твердого топлива со значительным выходом летучих к росту удельного выхода генераторного газа с единицы топлива, снижению теплоты сгорания газа и повышению его температуры. Однако при этом имеют место меньшие значения расхода воздуха и пара на единицу исходного топлива, что обуславливается значительно меньшим количеством нелетучего углерода, приходящимся на единицу исходного топлива.

В исследованном диапазоне изменения состава дутья теплота сгорания полученного газа меняется в пределах 8-9 МДж/м³ (т. е. на 20-40 % выше, чем для антрацита или коксового остатка), а выход газа с единицы угля составляет 2,82-3 м³/кг. Полученные большие значения теплоты сгорания и меньшие удельные выходы генераторного газа в случае газификации угля со значительным выходом летучих по сравнению с газификацией коксового остатка или антрацитов объясняются образованием в виде летучих и включением в состав генераторного газа значительного количества метана.

Также можно заключить, что соотношение воздух-пар является самым существенным рычагом управления процессов газификации твердого топлива по смешанной схеме, так как позволяет в широких пределах изменять теплотехнические характеристики процесса в зависимости от требований потребителя.

Выводы и перспективы дальнейших исследований

В данной работе создана методика инженерного расчета процесса производства смешанного генераторного газа из твердого топлива. Отличием данной методики от известных является учет выделения летучих газов при определении итогового состава генераторного газа, а также совместное рассмотрение материального и теплового балансов процесса газификации.

Созданная методика предназначена для решения вопросов, связанных с предварительной расчетной проработкой технологии производства смешанного генераторного газа, получением значений базовых теплотехнологических параметров на стадии проектирования; созданием в рамках систем АСУ ТП реально действующих агрегатов компонентов прогнозного управления.

Установлены основные теплотехнические характеристики процесса газификации по смешанной схеме твердого топлива со значительным выходом летучих в пределах изменения соотношения воздух-пар в дутье

$$\frac{1,33 \text{ м}^3 / \text{кг}}{0,34 \text{ кг} / \text{кг}} - \frac{1,77 \text{ м}^3 / \text{кг}}{0,19 \text{ кг} / \text{кг}}$$

Библиографический список

1. Шиллинг Г.-Д. Газификация угля / Г.-Д. Шиллинг, Б. Бонн, У. Краус. – М.: Недра, 1968. – 175 с.
2. Кравцов В. В. Экономическое использование угля в теплоэнергетике / В. В. Кравцов, А. Г. Махмудов, А. В. Харченко – Донецк: ДонГТУ, 1999. – 320 с.
3. Парахін М. Ф. Спеціальні питання спалення та термічної переробки палива / М. Ф. Парахін, В. І. Шелудченко, В.В. Кравцов. – Донецьк: РІА ДонДТУ, 1999. – 252 с.
4. Шафорост Д. А. Математическое моделирование барботажных процессов, протекающих при газификации угля в расплаве шлака / Д. А. Шафорост, А. А. Мадоян // Теплоэнергетика. – 1999. – № 4. – С. 66-69.
5. Кравцов В. В. Разработка методики по определению температуры в зоне активного горения твердого топлива при добавках к воздушному дутью воды или пара / В. В. Кравцов, Г. Г. Махов, В. И. Шелудченко, А. Б. Бирюков // Сборник научных трудов Донбасского горно-металлургического института. Вып. 15. Алчевск: ДГМИ, 2002. – С. 29-30.
6. Кравцов В. В. Теплотехника термической переработки твердых топлив: учебное пособие / В. В. Кравцов, А. Б. Бирюков, И. П. Дробышевская. – Донецк: Изд-во «Ноулидж», 2011. – 170 с.

Поступила 28.03.2014