

EDN: DKFHVY

УДК 62–97

## Method for Determining Optimal Parameters of Operating State in Atmospheric Coal Gas Generator

**Pak Chol Min\***

*Far Eastern Federal University  
Vladivostok, Russian Federation*

Received 22.01.2023, received in revised form 05.03.2023, accepted 10.03.2023

**Abstract.** This article describes one method for determining the optimal operating parameters of an atmospheric coal gas generator from the composition of the resulting generator gas. The atmospheric gas generator is a device for producing synthesis gas for fuel in the power industry, and complex physical and chemical processes are carried out inside the gas generator, so it is difficult to determine its optimal parameters. A study was conducted to determine the optimal parameters by calculating the operating parameters based on the elemental analysis composition of the coal and the composition of the produced generator gas and comparing them with the current operating parameters to achieve the best conditions. As a result of the calculation, the air flow, steam flow, energy conversion efficiency of the gas generator, the composition of the gas that should have been obtained in the current operating state are calculated, and the operating parameters are specified by comparing and analysing with the actual values. The results of the study have been successfully introduced in a test atmospheric gas generator and can be extended to other types of gas generators.

**Keywords:** atmospheric gas generator, synthetic gas, diagnostics of the operating condition, optimization of parameters of gas generator.

Citation: Pak Chol Min. Method for determining optimal parameters of operating state in atmospheric coal gas generator. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol.*, 2023, 16(3), 272–277. EDN: DKFHVY



## Методика определения оптимальных параметров рабочего состояния атмосферного газогенератора из угля

Пак Чхоль Мин

*Дальневосточный федеральный университет  
Российская Федерация, Владивосток*

**Аннотация.** В данной статье описана методика определения оптимальных параметров работы атмосферного угольного газогенератора, когда известен состав полученного генераторного газа. Атмосферный газогенератор представляет собой устройство для получения синтез-газа для топлива в энергетике, внутри которого ведутся сложные физико-химические процессы, поэтому определить оптимальные параметры затруднительно. Было проведено исследование для определения оптимальных параметров путем расчета рабочих параметров на основании данных состава элементного анализа угля и состава полученного генераторного газа и сравнения их с текущими рабочими параметрами для достижения наилучших условий. В результате был рассчитан расход воздуха, расход пара, эффективность преобразования энергии газогенератора, состав газа, который должен быть в текущем рабочем состоянии, и уточнены рабочие параметры путем сравнения и анализа с фактическими значениями. Результаты исследования были успешно внедрены в тестовый атмосферный газогенератор и могут быть распространены на другие типы газогенераторов.

**Ключевые слова:** атмосферный газогенератор, синтез-газ, диагностика рабочего состояния, оптимизация параметров газогенератора.

Цитирование: Пак Чхоль Мин. Методика определения оптимальных параметров рабочего состояния атмосферного газогенератора из угля / Пак Чхоль Мин // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2023, 16(3). С. 272–277. EDN: DKFHVV

### Введение

В настоящее время из-за нестабильности мирового энергетического рынка многие страны пытаются реализовать диверсификацию структуры источников энергии. Технология газификации угля имеет важное значение в разрешении кризиса энергоресурсов в соответствии с особенностями стран. В странах, где нет нефти или природного газа, можно производить синтез-газ из угля и использовать его в качестве промышленного топлива. И в России в регионах с большими запасами угля можно заменить дорогой природный газ генераторным газом или сократить потребление природного газа.

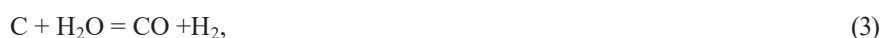
Технология газификации угля используется для получения горючего газа из угля. Синтез-газ, полученный путем газификации угля при атмосферном давлении, состоит из углекислого газа и водорода, которые используются в качестве топлива для газовой турбины или для металлургических и химических промышленности [1].

Качество газа, производимого в газогенераторе, тесно связано с рабочим состоянием газогенератора [2]. Из-за конструктивной и технологической сложности газогенератора трудно предсказать его рабочее состояние только по визуальному наблюдению или по нескольким датчикам. Целью данной работы является разработка методики определения оптимальных параметров для атмосферного газогенератора данного состава газа, полученного из газогенератора.

### Методология исследования

Внутри газогенератора происходят сложные физические и химические процессы, такие как сушка угля, пиролиз, горение угля, реакция газификации, движение флюидов, тепло- и массообмен между средами. В табл. 1 показаны процессы в газогенераторе с плотным слоем [3].

Химическая реакция, протекающая в газогенераторе, в результате может быть сведена к четырем реакциям.



В общем виде состав угля дается как состав рабочего топлива и состав элементного анализа. Расчет по элементному составу, а не по составу рабочего топлива угля позволяет более точно оценить рабочее состояние газогенератора. Состав угля можно анализировать согласно ISO 17247:2020.

Кислород, поступающий в газогенератор, используется для производства  $\text{CO}_2$  в окислительной реакционной зоне. То есть кислород должен быть полностью израсходован в этой зоне. Следовательно, оптимальное рабочее состояние газогенератора можно определить как состояние, при котором содержание кислорода в генерируемом газе составляет 0 %. На практике, если концентрация кислорода в добываемом газе составляет менее 0,5 %, считается, что газогенератор находится в нормальном рабочем состоянии [4]. В исследовании описывается методика определения наилучших рабочих параметров в установившихся режимах работы газогенератора.

Таблица 1. Характеристика процессов газификации в плотном слое

Table 1. Characteristics of gasification processes in a dense layer

Зоны в газогенераторе	Процессы, реакции	Выделяемые и транспортируемые компоненты
Надслоевое пространство		Генераторный газ, унос угольной пыли, водяные пары, смолы
Зона сушки и выделения летучих веществ	Сушка топлива и сухая перегонка угля	Водяные пары и смолы, $\text{H}_2\text{S}$ , $\text{CH}_4$ , $\text{C}_m\text{H}_n$ , $\text{CO}_2$ , $\text{CO}$ , $\text{H}_2$ , $\text{H}_2\text{O}$
Вторая восстановительная зона (низкотемпературной карбонизации)	$\text{C} + \text{CO}_2 = 2\text{CO}$ $\text{C} + 2\text{H}_2 = \text{CH}_4$ $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO}_2 + \text{H}_2$	$\text{CO}_2$ , $\text{CO}$ , $\text{H}_2$ , $\text{CH}_4$ , $\text{H}_2\text{O}$
Первая восстановительная зона (высокотемпературной карбонизации)	$\text{C} + \text{CO}_2 = 2\text{CO}$ $\text{C} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + \text{H}_2$ $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO}_2 + \text{H}_2$	$\text{CO}_2$ , $\text{CO}$ , $\text{H}_2$ , $\text{H}_2\text{O}$
Окислительная реакционная зона (кислородная)	$\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$ $\text{C} + \text{CO}_2 = 2\text{CO}$ $2\text{CO} + \text{O}_2 = 2\text{CO}_2$	$\text{O}_2$ , $\text{CO}_2$ , $\text{CO}$ , $\text{H}_2\text{O}$
Зольная подушка		Зола, шлак, кокс

Предположим, что элементный состав угля задан как  $C^P, H^P, O^P, A^P, W^P$  (кг/кг).

Из них часть  $C^P$  реагирует с кислородом топлива, превращаясь в  $CO_2$ . При этом количество газа  $CO_2$ , образующегося из кислорода в топливе, рассчитывается таким образом:

$$V_{CO_2}^m = \frac{22.4}{32} O^P. \quad (5)$$

В этом случае потребляемый углерод равен  $\frac{12}{32} O^P$ .

Водород в составе угля входит в состав газа в виде  $H_2$ . Это количество:

$$V_{H_2}^m = \frac{22.4}{2} H^P. \quad (6)$$

Если содержание углерода в золе генератора равно  $C^3$ , то углерод, выходящий с золой, равен  $A^P C^3$ .

В итоге углерод, участвующий в реакции газификации:

$$C = C^P - \frac{12}{32} O^P - \frac{A^P C^3}{1 - C^3}. \quad (7)$$

Если количество углерода, израсходованного в каждой реакции, равно  $C_1, C_2, C_3$  и  $C_4$  соответственно, устанавливается следующее уравнение.

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4. \quad (8)$$

Если коэффициент расхода воздуха равен  $n$ , расход воздуха, расход водяного пара и количество продуктов для каждой реакции на 1 кг топлива будет следующим.

Для реакции (1):

$$V_B^{C_1} = 8,89n C_1 \text{ м}^3$$

$$V_{CO_2}^{C_1} = 1,867 C_1 \text{ м}^3$$

$$V_{N_2}^{C_1} = 7,022n C_1 \text{ м}^3$$

$$V_{O_2}^{C_1} = 1,867(n-1) C_1 \text{ м}^3.$$

Для реакции (2):

$$V_B^{C_2} = 4,44n C_2 \text{ м}^3$$

$$V_{CO}^{C_2} = 1,867 C_2 \text{ м}^3$$

$$V_{N_2}^{C_2} = 3,511n C_2 \text{ м}^3$$

$$V_{O_2}^{C_2} = 0,933(n-1) C_2 \text{ м}^3.$$

Для реакции (3):

$$V_{H_2O}^{C_3} = 1,867 C_3 \text{ м}^3$$

$$V_{H_2}^{C_3} = 1,867 C_3 \text{ м}^3$$

$$V_{CO}^{C_3} = 1,867 C_3 \text{ м}^3.$$

Для реакции (4):

$$V_{H_2}^{C_4} = 3,734 C_4 \text{ м}^3$$

$$V_{CH_4}^{C_4} = 1,867 C_4 \text{ м}^3.$$

В результате количество каждого компонента в генераторном газе следующее.

$$V_{CO_2} = V_{CO_2}^{C_1} + V_{CO_2}^m$$

$$V_{CO} = V_{CO}^{C_2} + V_{CO}^{C_3}$$

$$V_{H_2} = V_{H_2}^{C_3} + V_{H_2}^m - V_{H_2}^{C_4}$$

$$V_{N_2} = V_{N_2}^{C_1} + V_{N_2}^{C_2}$$

$$V_{O_2} = V_{O_2}^{C_1} + V_{O_2}^{C_2}$$

$$V_{CH_4} = V_{CH_4}^{C_4}$$

С другой стороны, если измеренный состав генераторного газа представлен как CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub>, количество газовых компонентов (м<sup>3</sup>) выражается по следующей формуле.

$$V_{CO_2} = V_G \cdot CO_2$$

$$V_{CO} = V_G \cdot CO$$

$$V_{H_2} = V_G \cdot H_2$$

$$V_{O_2} = V_G \cdot O_2$$

$$V_{N_2} = V_G \cdot N_2$$

$$V_{CH_4} = V_G \cdot CH_4,$$

где  $V_G$  количество образовавшегося газа.

В результате устанавливаются следующие уравнения:

$$1,867C_1 + V_{CO_2}^m = V_G \cdot CO_2. \quad (9)$$

$$1,867C_2 + 1,867C_3 = V_G \cdot CO. \quad (10)$$

$$1,867C_3 + V_{H_2}^m - 3,734C_4 = V_G \cdot H_2. \quad (11)$$

$$1,867(n-1)C_1 + 0,933(n-1)C_2 = V_G \cdot O_2. \quad (12)$$

$$7,022nC_1 + 3,511nC_2 = V_G \cdot N_2. \quad (13)$$

$$1,867C_4 = V_G \cdot CH_4. \quad (14)$$

Неизвестными являются  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_4$ ,  $n$  и  $V_G$  и существует 7 формул для их расчета: Уравнение 8–14. На самом деле, поскольку N<sub>2</sub> и O<sub>2</sub> поступают из воздуха, их соотношения постоянны и определяются коэффициентом расхода воздуха. Отсюда уравнения (12) и (13) становятся эквивалентными выражениями, поэтому уравнения также замыкаются как (6).

### Результат и вывод исследования

Если уравнения (9) и (10) сложить вместе и принять во внимание уравнение (8), количество образовавшегося газа можно рассчитать следующим образом:

$$V_G = \frac{1,867C + \frac{22,4}{32} O^P}{CO_2 + CO}. \quad (15)$$

$C_1$  рассчитывается по уравнению (9),  $C_4$  рассчитывается по уравнению (14) и  $C_3$  по уравнению (11), а  $C_2$  получают из уравнения (8).

Коэффициент расхода воздуха рассчитывается по уравнениям (12) и (13), и используется среднее значение двух расчетных значений. Следующими уравнениями рассчитывается количество воздуха и водяного пара при учете степени разложения пара  $\eta_{H_2O}$ . Степень разложения пара – это доля пара, эффективно используемого для реакции газификации, среди подаваемого в газогенераторе пара.

$$V_B = (8,889C_1 + 4,445C_2)n. \quad (16)$$

$$V_{H_2O} = 1,867C_3 / \eta_{H_2O}. \quad (17)$$

КПД газогенератора рассчитывается следующим образом:

$$\eta = \frac{126,44CO + 107,6H_2 + 358CH_4}{Q_H^p} V_G. \quad (18)$$

Здесь знаменатель – теплотворная способность угля.

Таким образом, рабочие параметры газогенератора могут быть рассчитаны на основании данных состава элементного анализа угля и состава генерирующего газа, а оптимальные параметры могут быть определены путем контрастного анализа с текущими рабочими параметрами.

Результаты расчетов хорошо согласуются с данными эксплуатации, и можно найти меры по улучшению работы, используя приведенные выше уравнения. Например, если содержание кислорода в газе уменьшается на  $x$ , содержание азота уменьшается в  $3,762x$  раза, а количество генераторного газа уменьшается в  $4,762x$  раза. Принимая это во внимание, можно рассчитать состав генераторного газа, а если повторить расчет по уточненному составу газа, можно определить оптимальные характеристики устройства.

### Список литературы / References

- [1] Marcio L. de Souza-Santos. *Solid fuels combustion and gasification: modeling, simulation, and equipment operations*. New York, 2010. 488.
- [2] Загрудинов Р. Ш., Нагорнов А. Н., Рыжков А. Ф., Сеначин П. К. *Технологии газификации в плотном слое*. Барнаул. Алтайский дом печати, 2009. 296. [Zagrudinov R. Sh., Nagornov A. N., Ryzhkov A. F., Senachin P. K.. *Gasification technologies in a fixed bed*. Barnaul. Altai Press House, 2009. 296 p. (in Rus.)]
- [3] Зайцев А. В., Рыжков А. Ф., Силин В. Е., Загрудинов Р. Ш., Попов А. В., Богатова Т. Ф. *Газогенераторные технологии в энергетике*. Екатеринбург. Сократ, 2010. 611. [Zaitsev A. V., Ryzhkov A. F., Silin V. E., Zagrudinov R. Sh., Popov A. V., Bogatova T. F. *Gasgenerating technologies in energy engineering*. Yekaterinburg. Socrat, 2010. 611 (in Rus.)]
- [4] Сюй Сянцзин, Лю Цзюнь. *Технология газификации угля*. Пекин, Издательство химической промышленности, 2005. 326 [Xu Xiangjing, Liu Jun. *Coal Gasification Technology*. Beijing, Chemical Industry Press, 2005. 326 (in China)]