

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-341-361>

УДК 662.765.1

## Новый метод расчета состава древесного генераторного газа обращенного процесса газификации

Е. М. Кашин<sup>1)</sup>, В. Н. Диденко<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова (Ижевск, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2019  
Belarusian National Technical University, 2019

**Реферат.** В статье излагается новый метод определения состава древесного генераторного газа, получаемого в газогенераторах обращенного процесса газификации. Анализируются недостатки существующих расчетных методов, главным из которых является плохое согласование результатов расчетов с опытными данными. Обосновывается приоритет основных химических реакций, протекающих при газификации древесного топлива. Выделяются три активные зоны газификации: окислительно-восстановительная, восстановительная и зона взаимодействия продуктов газификации между собой и с углеродом топлива. Окислительно-восстановительная зона в общем случае состоит из двух подзон: в первой протекают реакции образования водяного газа, а вторая появляется при подаче в газогенератор избыточного воздуха. Предлагаемый метод расчета компонентов генераторного газа – это совокупность модифицированного балансового и добавленного методов расчета концентрации продуктов химических реакций по константам равновесия этих реакций в активных зонах газификации с различными температурами. В модифицированном балансовом методе рассматриваются первичные процессы превращения древесины и влажного воздуха в компоненты генераторного газа в первой подзоне окислительно-восстановительной зоны. Модифицированный балансовый метод основан на уравнениях материального баланса углерода, водорода, кислорода, влаги, азота и теплового баланса системы. В добавленном методе определяются концентрации компонентов генераторного газа во второй подзоне окислительно-восстановительной зоны, а также в восстановительной зоне и зоне взаимодействия продуктов газификации между собой и с углеродом топлива. Совокупность этих двух методов позволяет расчетным путем с большой точностью определять выход генераторного газа, концентрации его компонентов, расход топлива и воздуха, а также ряд других характеристик газогенератора.

**Ключевые слова:** концентрация компонента газа, уравнение баланса углерода, уравнение баланса водорода, уравнение баланса кислорода, уравнение баланса влаги, константа равновесия химической реакции, гомогенная реакция, гетерогенная реакция

**Для цитирования:** Кашин, Е. М. Новый метод расчета состава древесного генераторного газа обращенного процесса газификации / Е. М. Кашин, В. Н. Диденко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62, № 4. С. 341–361. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-341-361>

---

### Адрес для переписки

Кашин Евгений Михайлович  
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова  
ул. 7-я Подлесная, 32а,  
426069, г. Ижевск, Российская Федерация  
Тел.: +7 3412 77-60-55 доб. 8102  
kawuh@ya.ru

### Address for correspondence

Kashin Evgeny M.  
Kalashnikov Izhevsk State Technical University  
32a 7 Podlesnaya str.  
426069, Izhevsk, Russian Federation  
Tel.: +7 3412 77-60-55 / 8102  
kawuh@ya.ru

---

## The New Method for Determining the Composition of Wood Gas Produced in Gas Generators of the Inverted Gasification Process

E. M. Kashin<sup>1)</sup>, V. N. Didenko<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Kalashnikov Izhevsk State Technical University (Izhevsk, Russian Federation)

**Abstract.** The article presents a new method for determining the composition of wood generator gas produced in gas generators of the inverted gasification process. The shortcomings of the existing calculation methods are analyzed, the main of which is the insufficient harmonization of the calculation results with the experimental data. The authors substantiate the priority of the main chemical reactions occurring during gasification of wood fuel. There are three active zones of gasification, viz.: a redox zone, a reduction zone and a zone of interaction of gasification products with each other and with the carbon of the fuel. In general, a redox zone consists of two subzones: in the first one reactions of water gas formation occur, and the second one appears when excess air is supplied to the gas generator. The proposed method for calculating the components of the generator gas is a set of a modified balance method and an added method for calculating the concentrations of chemical reaction products by the equilibrium constants of these reactions in the active gasification zones with different temperatures. The modified balance method considers the primary processes of wood and moist air transformation into components of the generator gas in the first subzone of the redox zone. The modified balance method is based on the equations of material balance of carbon, hydrogen, oxygen, moisture, nitrogen and thermal balance of the system. The added method determines the concentrations of the components of the generator gas in the second subzone of the redox zone, as well as in the reduction zone and the zone of interaction of the gasification products with each other and with the fuel carbon. The combination of these two methods makes it possible to calculate with greater accuracy the output of the generator gas, the concentration of its components, fuel and air consumption, as well as a number of other characteristics of the gas generator.

**Keywords:** concentration of gas component, equation of carbon balance, equation of hydrogen balance, equation of oxygen balance, equation of water balance, balance constant of chemical reaction, homogeneous reaction, heterogeneous reaction

**For citation:** Kashin E. M., Didenko V. N. (2019) The New Method for Determining the Composition of Wood Gas Produced in Gas Generators of the Inverted Gasification Process. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 62 (4), 341–361. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-341-361> (in Russian)

### Введение

Газогенератор обращенного процесса газификации по отношению к газогенератору прямой схемы обладает рядом преимуществ, главными из которых являются: работа на различных видах топлива, низкое содержание смол в продуктах газификации, загрузка топлива без остановки процесса газификации, сонаправленность центробежных сил и потока генераторного газа (для газогенераторов роторного типа [1]). Считается, что в газогенераторе обращенной схемы абсолютно все элементы топлива, включая влагу, участвуют в процессе образования газа. Для расчета состава газа обращенного процесса газификации используется общепринятый балансовый метод, основанный на составлении материального и теплового балансов по заданному составу топлива [2–5]. Метод имеет ряд недостатков:

- результаты расчетов плохо согласуются с опытными данными (табл. 1);
- полагается, что влага диссоциирует на водород и кислород, хотя температура в древесных газогенераторах намного ниже 2000 °С;

- не учитывается химическое взаимодействие продуктов газификации друг с другом и с углеродом вновь поступающего нагретого топлива в других температурных областях реальной активной зоны газификации;
- в явном виде не учитывается коэффициент избытка воздуха;
- содержание метана в продуктах газификации не определяется и в окончательных расчетах задается величиной  $CH_4 = 1,5 \%$ ;
- не учитывается влага воздуха, используемого в качестве газифицирующего агента;
- для широкого диапазона изменения температуры в зоне газификации константа равновесия химической реакции водяного газа принимается средним значением в интервале от 1,7 до 2,5.

Перечисленные недостатки балансового метода [2] делают актуальной разработку нового метода расчета состава древесного генераторного газа (табл. 1).

Таблица 1

Сухой состав генераторного газа (%) по расчетам методики Н. Г. Юдушкина [2], по опытным данным Д. Б. Гинзбурга [3] и В. А. Лямина [6]

Dry composition of the generator gas (%) calculated by Yudushkin's method [2], according to Ginzburg's experimental data [3] and Lyamin's data [6]

CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>
Н. Г. Юдушкин [2]. Топливо – береза, влажность $W = 28 \%$ , $T = 1500 \text{ K}$ , $K = 2,49$					
19,1	11,4	16,6	–	1,5	51,5
Д. Б. Гинзбург [3]. Топливо – береза, $W = 28 \%$					
27,5	7,6	11,4	0,4	1,9	50,8
В. А. Лямин [6]. Топливо – береза, $W = 15\text{--}20 \%$					
30,8	4,3	5,6	0,3	1,4	57,6

### Основная часть

Разработан метод расчета состава генераторного газа, представляющий совокупность балансового метода [2], модифицированного авторами статьи, и добавленного метода расчета концентраций продуктов химических реакций по константам равновесия этих реакций в активных зонах газификации с различными температурами.

Для разработки нового метода расчета состава древесного генераторного газа потребовалось установить приоритеты и границы температурных зон протекания химических реакций в газогенераторе.

Способность веществ химически взаимодействовать друг с другом при  $T, P = \text{const}$  определяется величиной и знаком изменения свободной энтальпии (энергии Гиббса)

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S,$$

где  $\Delta H$  – изменение энтальпии (теплого эффекта) химической реакции;  
 $\Delta S$  – изменение энтропии химической реакции.

Химическая реакция при условиях  $T, P = \text{const}$  возможна, если  $\Delta G < 0$ . При  $\Delta G = 0$  реакция находится в состоянии равновесия. При  $\Delta G > 0$  химическая реакция невозможна. Чем больше по модулю отрицательная величина  $\Delta G$ , тем больше реакционная способность веществ, и доля реакции в системе химических превращений.

Доля  $i$ -й реакции в системе химических превращений определяется отношением

$$\omega_i = \frac{\Delta G_i}{\sum \Delta G}$$

В случаях, когда  $\Delta G > 0$  и химическая реакция невозможна, значение  $\Delta G_i$  и доля реакции  $\omega_{pi}$  принимаются равными 0.

Величины  $\Delta H_{pi}$ ,  $\Delta S_{pi}$ ,  $\Delta G_i$  и  $\omega_i$  для  $i$ -х реакций, полученные по значениям изменений энтальпии и энтропии реагентов и продуктов реакций [7], приведены в табл. 2.

В предлагаемом методе, в отличие от существующего, выделяются не одна, а три активные зоны газификации (рис. 1, табл. 2):

1 – окислительно-восстановительная зона (ОВЗ), состоящая в общем случае из двух подзон (1.0 и 1.1). В подзоне 1.0 (БОВП) протекают реакции образования водяного газа. Температура в окислительно-восстановительной зоне в зависимости от теплоизоляции газогенератора составляет 60–85 % от адиабатной температуры горения топлива. При подаче в газогенератор избыточного воздуха ( $\alpha > 1$ ) появляется подзона 1.1 (ПДО), где идут дополнительные окислительные реакции;

2 – восстановительная зона (ВЗ), где отсутствует окислитель и протекают только восстановительные реакции. По величине  $\Delta G$  этих химических реакций получено, что температура в восстановительной зоне выше 980 °С;

3 – зона взаимодействия продуктов газификации между собой и с углеродом топлива (ЗВП). По величине  $\Delta G$  химических реакций, приведенных в табл. 2, получено, что температура в этой зоне ниже 980 °С.

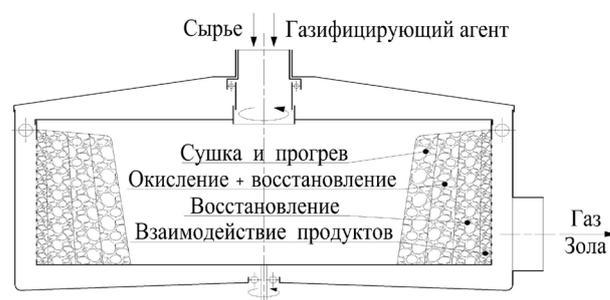


Рис. 1. Структура активной зоны газификации в газогенераторе роторного типа при центральной подаче газифицирующего агента (обращенная схема газификации)

Fig. 1. The structure of the gasification zone in rotary gas generator at the central supply of the gasifying agent (reversed gasification scheme)

Таблица 2

## Приоритет химических реакций в различных температурных зонах газогенератора

## The priority of chemical reactions in different temperature zones of the gas generator

№ реакции в активной зоне	Реакция	$\Delta H_{pi}$ , кДж/моль	$\Delta S_{pi}$ , Дж/(моль·К)	T, К	$\Delta G_i$ , Дж/моль	$\Sigma \Delta G$ , Дж/моль	$\omega_i$ , доли ед.
1. Окислительно-восстановительная зона							
1.0 Балансовая окислительно-восстановительная подзона							
0	$\text{CO}_2 + \text{H}_2 \leftrightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$	41,17	41,94	1500	-21740	-21740	1
1.1. Подзона дополнительного окисления избыточным кислородом при $\alpha > 1$							
1	$\text{C} + \text{O}_2 \leftrightarrow \text{CO}_2$	-393,51	2,83	1500	-397755	-1446410	0,27
2	$2\text{C} + \text{O}_2 \leftrightarrow 2\text{CO}$	-221	178,29	1500	-488435		0,34
3	$2\text{CO} + \text{O}_2 \leftrightarrow 2\text{CO}_2$	-172,51	24,77	1500	-209665		0,14
4	$2\text{H}_2 + \text{O}_2 \leftrightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	-483,68	-88,75	1500	-350555		0,24
2. Восстановительная зона							
1	$\text{CO}_2 + \text{H}_2 \leftrightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$	41,17	41,94	1200	-9158	-95810	0,10
2	$\text{C} + \text{CO}_2 \leftrightarrow 2\text{CO}$	172,51	175,46	1200	-38042		0,40
3	$\text{C} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO} + \text{H}_2$	131,34	133,52	1200	-28884		0,30
4	$\text{C} + 2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2$	90,17	91,58	1200	-19726		0,21
3. Зона взаимодействия продуктов между собой и с углеродом топлива							
1	$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$	-41,17	-41,94	950	-1327	-5267	0,25
2	$\text{C} + 2\text{H}_2 \leftrightarrow \text{CH}_4$	-74,85	-80,75	950	0		0,00
3	$\text{CO} + 3\text{H}_2 \leftrightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$	-206,19	-214,27	950	-2633,5		0,50
4	$\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \leftrightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$	-165,02	-172,33	950	-1306,5		0,25

Предложенный метод позволяет вычислить выход, концентрации компонентов генераторного газа, определить расход топлива и воздуха, а также ряд других характеристик работы газогенератора.

Генераторный газ в газогенераторе считается идеальным, поэтому объемное содержание компонентов в газе соответствует их мольному содержанию. Состав генераторного газа зависит от активной зоны и имеет следующий наиболее общий вид:

$$\text{CO} + \text{CO}_2 + \text{CH}_4 + \text{H}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2 + \text{O}_2^{\text{изб}} = 100 \%,$$

где  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2^{\text{изб}}$  – процентное содержание соответствующих газов по объему.

В отличие от [2], состав газа включает  $\text{O}_2^{\text{изб}}$  и  $\text{CH}_4$ . Наличие в составе газа неизрасходованного кислорода  $\text{O}_2^{\text{изб}}$  возможно только на выходе из подзоны 1.0 (БОВП) окислительно-восстановительной зоны 1 при  $\alpha > 1$ . Метан  $\text{CH}_4$  появляется только на выходе из зоны 3.

**Модифицированный балансовый метод  
(материальный и тепловой балансы)**

Исходными составляющими материального баланса являются влажные топливо и воздух, а конечными – влажный генераторный газ, недожог и зола. В отличие от [2], в качестве газифицирующего агента рассматривается не сухой, а влажный воздух. Тепловой баланс составляется по низшей теплоте сгорания топлива, определяемой расчетным путем.

Элементарный состав твердого органического топлива (по рабочей массе)

$$C^p + H^p + O^p + N^p + S^p + W^p + A^p = 100 \%,$$

где  $C^p, H^p, O^p, N^p, S^p, W^p, A^p$  – массовые процентные содержания элементов в исходном рабочем твердом топливе. Для древесного топлива  $S^p \cong 0$ .

Для удобства работы с малоразмерными коэффициентами уравнений расчет производится для 100 кмоль влажного генераторного газа.

Для определения выхода  $v_{в.г}$  из 1 кг топлива, содержания компонентов генераторного газа  $CO, CO_2, H_2, H_2O, N_2$  и избыточного кислорода  $O_2$  в конце первой активной зоны требуется семь уравнений, составленных из материального и теплового балансов процесса газификации, учитывающих константу равновесия реакции образования водяного газа.

Переход элементов топлива ( $C^p, H^p, O^p, N^p, W^p$ ) и воздуха ( $O_2^b, N_2^b$ , влага) в генераторный газ осуществляется по четырем основным уравнениям материального баланса углерода, водорода, кислорода и влаги.

Объем 100 кмоль генераторного газа при нормальных физических условиях ( $t = 0 \text{ }^\circ\text{C}, P = 760 \text{ мм рт. ст.}$ ) по закону Авогадро

$$V_{в.г} = 100 \cdot 22,4 \text{ м}^3.$$

Масса рабочего топлива, кг, необходимая для получения  $V_{в.г}$  газа:

$$G_t = \frac{V_{в.г}}{v_{в.г}} = \frac{100 \cdot 22,4}{v_{в.г}},$$

где  $v_{в.г}$  – выход влажного газа из 1 кг топлива,  $\text{м}^3/\text{кг}$ .

**Уравнение баланса углерода**

Баланс углерода заключается в том, что количество углерода до и после химических реакций не изменяется. Количество углерода (кмоль), содержащегося в топливе массой  $G_t$ , определяется по уравнению

$$C_t^p = \frac{G_t C^p}{100 \mu_C} = \frac{100 \cdot 22,4 C^p}{v_{в.г} 100 \cdot 12} = \frac{1,867 C^p}{v_{в.г}},$$

где  $\mu_C$  – молекулярная масса углерода.

В первой активной зоне углерод в количестве  $C_{\text{д}}^{\text{P}}$  переходит в газообразные компоненты CO и CO<sub>2</sub>

$$C_{\text{д}}^{\text{P}} = C^{\text{P}} (100 - \delta) / 100,$$

где  $C_{\text{д}}^{\text{P}}$  – действительное процентное содержание углерода по рабочей массе, необходимое для образования 100 кмоль влажного генераторного газа;  $\delta$  – потери углерода, связанные с образованием золы и шлака, %.

Тогда уравнение баланса углерода запишется в виде

$$\frac{1,867C_{\text{д}}^{\text{P}}}{\nu_{\text{в.г}}} = \text{CO} + \text{CO}_2. \quad (1)$$

### Уравнение баланса водорода

Весь водород  $\text{H}^{\text{P}}$  твердого топлива после химического взаимодействия превращается в водород генераторного газа (содержанием водорода в шлаке пренебрегается ввиду незначительности).

Количество водорода (кмоль) в массе  $G_{\text{т}}$  рабочего топлива определяется по уравнению

$$\text{H}_{\text{т}}^{\text{P}} = \frac{G_{\text{т}} \text{H}^{\text{P}}}{100 \mu_{\text{H}_2}} = \frac{100 \cdot 22,4 \text{H}^{\text{P}}}{\nu_{\text{в.г}} 100 \cdot 2} = \frac{11,2 \text{H}^{\text{P}}}{\nu_{\text{в.г}}},$$

где  $\mu_{\text{H}_2}$  – молекулярная масса водорода.

Тогда уравнение баланса водорода запишется в следующем виде

$$\frac{11,2 \text{H}^{\text{P}}}{\nu_{\text{в.г}}} = \text{H}_2. \quad (2)$$

Уравнение (2) отличается от [2] тем, что не включает водород от диссоциации паров воды на H<sub>2</sub> и O<sub>2</sub>.

### Уравнение баланса кислорода

Количество кислорода (кмоль) в рабочей массе топлива

$$\text{O}_{\text{т}}^{\text{P}} = \frac{G_{\text{т}} \text{O}^{\text{P}}}{100 \mu_{\text{O}_2}} = \frac{100 \cdot 22,4 \text{O}^{\text{P}}}{\nu_{\text{в.г}} 100 \cdot 32} = \frac{0,7 \text{O}^{\text{P}}}{\nu_{\text{в.г}}},$$

где  $\mu_{\text{O}_2}$  – молекулярная масса кислорода.

Количество воздуха (кмоль), необходимое для сжигания рабочей массы топлива  $G_{\text{т}}$  при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha$ :

$$v_B = \frac{M_B}{\mu_B} = \frac{G_T V_o \rho_B \alpha}{\mu_B} = \frac{100 \cdot 22,4 V_o \rho_B \alpha}{v_{B,Г} \mu_B},$$

где  $M_B$  – масса воздуха, необходимая для сжигания  $G_T$  (кг) топлива при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha$ , кг;  $V_o$  – теоретический объем воздуха, необходимый для полного сжигания 1 кг рабочего топлива при  $\alpha = 1$  м<sup>3</sup>/кг;  $\rho_B$  – плотность влажного воздуха при нормальных физических условиях, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu_B$  – кажущаяся молекулярная масса влажного воздуха, кг/моль;

$$\rho_B = \frac{B}{R_B T} - 0,0013 \frac{\varphi P_H}{T}; \quad \mu_B = 28,96 - 10,944 \frac{\varphi P_H}{B},$$

$B$  – барометрическое давление, Па;  $\varphi$  – относительная влажность, доли ед.;  $P_H$  – давление насыщения водяного пара при температуре  $T$ , Па;  $R_B$  – удельная газовая постоянная сухого воздуха, Дж/(кг·К).

Давление насыщения водяного пара  $P_H$  при температуре  $T$  определяется по таблицам насыщенного водяного пара или по приближенной зависимости

$$P_H = 479 + (11,52 + 1,62(T - 273))^2.$$

Полагается, что объемная доля кислорода в воздухе равна 0,21, и уравнение баланса кислорода записывается в следующем виде:

$$\frac{0,7O^p}{v_{B,Г}} + 0,21v_B = CO_2 + 0,5(CO + H_2O) + 0,21v_B^{изб}, \quad (3)$$

где  $0,21v_B$  – количество кислорода в подаваемом воздухе;  $0,21v_B^{изб}$  – количество кислорода избыточного воздуха в составе продуктов газификации в окислительно-восстановительной зоне 1;

$$v_B^{изб} = \frac{100 \cdot 22,4 V_o \rho_B \beta}{v_{B,Г} \mu_B}, \quad \beta = \begin{cases} 0 & \text{при } \alpha \leq 1; \\ (\alpha - 1) & \text{при } \alpha > 1. \end{cases}$$

В (3), в отличие от [2], в явном виде учтен коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  и отсутствует  $O_2$  от диссоциации паров воды.

### Уравнение баланса влаги

Количество влаги (кмоль), содержащейся в топливе массой  $G_T$ :

$$H_2O^p = \frac{100 \cdot 22,4 W^p}{v_{B,Г} 100 \cdot 18} = \frac{1,244 W^p}{v_{B,Г}}.$$

Количество влаги (кмоль), содержащейся в подаваемом воздухе:

$$v_{H_2O}^B = \frac{M_{H_2O}}{\mu_{H_2O}},$$

где  $M_{H_2O}$  – масса водяного пара, содержащегося во влажном воздухе, кг;  $\mu_{H_2O}$  – молекулярная масса воды, кг/моль.

Масса водяного пара в воздухе определяется по известному влаго-содержанию воздуха  $d$

$$M_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{d}{1+d} \frac{100 \cdot 22,4 V_o \rho_B \alpha}{v_{\text{в.г}}}$$

Тогда количество влаги (кмоль), содержащейся в воздухе:

$$v_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{в}} = \frac{d}{1+d} \frac{100 \cdot 22,4 V_o \rho_B \alpha}{v_{\text{в.г}} \mu_{\text{H}_2\text{O}}}$$

Окончательно уравнение баланса влаги запишется следующим образом:

$$\frac{1,244 W^{\text{п}}}{v_{\text{в.г}}} + v_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{в}} = \text{H}_2\text{O}. \quad (4)$$

В (4), в отличие от [2], учтено влагосодержание подаваемого воздуха.

Так как диссоциация водяного пара на водород и кислород возможна только при температурах выше  $2000^\circ\text{C}$ , недостижимых для древесных газогенераторов, то вся влага топлива и влажного воздуха полностью переходит в водяной пар генераторного газа.

### Уравнение баланса азота

Замыкающим уравнением материального баланса является уравнение баланса азота

$$100 - (\text{CO} + \text{CO}_2 + \text{H}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2^{\text{изб}}) = \text{N}_2^{\text{г}}.$$

Количество азота до и после процессов горения и газификации остается практически неизменным, так как азот не участвует в химических реакциях, поэтому количество азота в генераторном газе  $\text{N}_2^{\text{г}}$  принимается равным количеству азота в воздухе  $\text{N}_2^{\text{в}}$  [8, 9]

$$\text{N}_2^{\text{г}} \cong \text{N}_2^{\text{в}} = 0,79 v_{\text{в}} = 0,79 \cdot \frac{100 \cdot 22,4 V_o \rho_B \alpha}{v_{\text{в.г}} \mu_{\text{в}}}$$

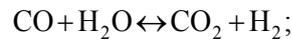
Принимается, что объемная доля азота в воздухе составляет 0,79.

И окончательно уравнение баланса азота запишется в виде

$$100 - (\text{CO} + \text{CO}_2 + \text{H}_2 + \text{H}_2\text{O} + 0,21 v_{\text{в}}^{\text{изб}}) = 0,79 v_{\text{в}}. \quad (5)$$

### Уравнения теплового баланса

Содержание  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2$  в окислительно-восстановительной зоне 1 зависит от температуры и определяется константой равновесия химической реакции образования водяного газа:



$$K_v = \frac{\text{CO} \cdot \text{H}_2\text{O}}{\text{CO}_2 \cdot \text{H}_2}. \quad (6)$$

По результатам исследований [4, 10–13] константу равновесия химической реакции можно найти по уравнению

$$\lg K_v = -\frac{2207,2}{T} + 0,9115 \lg T - 9,738 \cdot 10^{-4} T + 1,487 \cdot 10^{-7} T^2 + 0,098.$$

Вторым уравнением теплового баланса является уравнение теплоты процесса газификации. Из определения условного КПД газогенератора следует

$$\eta_{\Gamma} = \frac{v_{\text{в.г}} Q_{\text{H}}^{\text{в.г}}}{Q_{\text{H}}^{\text{p}}},$$

где  $v_{\text{в.г}}$  – выход влажного газа из 1 кг топлива, м<sup>3</sup>/кг;  $Q_{\text{H}}^{\text{p}}$  – низшая теплота сгорания рабочей массы газифицируемого твердого топлива;  $Q_{\text{H}}^{\text{в.г}}$  – низшая теплота сгорания влажного газа, кДж/м<sup>3</sup>, определяемая по известной зависимости

$$Q_{\text{H}}^{\text{в.г}} = 127,7\text{CO} + 107,6\text{H}_2 + 356,7\text{CH}_4.$$

Поскольку метан в окислительно-восстановительной зоне 1 не образуется из-за высоких температур, уравнение теплового баланса запишется в виде

$$\frac{Q_{\text{H}}^{\text{p}} \eta_{\Gamma}}{v_{\text{в.г}}} = 127,7\text{CO} + 107,6\text{H}_2. \quad (7)$$

Низшая теплота сгорания рабочей массы газифицируемого твердого топлива, как и в [2, 5, 8–10], определялась в кДж/кг по формуле Д. И. Менделеева

$$Q_{\text{H}}^{\text{p}} = 340\text{C}^{\text{p}} + 1035\text{H}^{\text{p}} - 109(\text{O}^{\text{p}} - \text{S}^{\text{p}}) - 25\text{W}^{\text{p}}.$$

Таким образом, выход влажного газа из 1 кг рабочего топлива и состав генераторного газа на выходе из окислительно-восстановительной зоны 1 определяются из совместного решения уравнений (1)–(7).

### Метод расчета концентраций продуктов химических реакций по константам равновесия этих реакций в активных зонах газификации с различными температурами

Обозначения (в соответствии с табл. 2):  $i, j$  – номер реакции и активной зоны;  $j = 1$  соответствует окислительно-восстановительная зона 1 (ОВЗ);  $j = 1.0$  – балансовая окислительно-восстановительная подзона 1.0 (БОВП),

рассматриваемая в модифицированном балансовом методе;  $j = 1.1$  – подзона дополнительного окисления 1.1 (ПДО);  $j = 2$  – восстановительная зона 2 (ВЗ);  $j = 3$  – зона взаимодействия продуктов между собой и углеродом топлива 3 (ЗВП);  $X$  – общее обозначение компонента генераторного газа;  $[X]_{ij}$  – конечная мольная доля компонента  $X$ , в % на 100 кмоль генераторного газа (далее – концентрация), создаваемая в результате протекания  $i$ -й реакции в  $j$ -й зоне;  $(R_X)_{ij}$  – начальная мольная доля (далее – концентрация) компонента  $X$ , в % на 100 кмоль генераторного газа, для  $i$ -й реакции в  $j$ -й зоне;  $\omega_{ij}$  – доля  $i$ -й реакции из системы химических превращений в  $j$ -й зоне, доли ед.;  $K_{ij}$  – константа равновесия  $i$ -й реакции в  $j$ -й зоне;  $[X]_{\Sigma j}$  – мольная доля (далее – концентрация) компонента  $X$ , в % на 100 кмоль генераторного газа, создаваемая в результате протекания всех реакций в  $j$ -й зоне.

### 1. Окислительно-восстановительная зона 1

ОВЗ в общем случае состоит из двух подзон: балансовой окислительно-восстановительной подзоны 1.0 (БОВП) и подзоны дополнительного окисления 1.1 (ПДО), существующей только при  $\alpha > 1$ .

Изложенный выше модифицированный балансовый метод рассматривает процессы перехода элементов твердого топлива (древесины) и газифицирующего агента (влажного воздуха) в компоненты генераторного газа только в БОВП без учета дополнительного окисления углерода и образующихся горючих газов CO и H<sub>2</sub> в случае избыточного воздуха ( $\alpha > 1$ ).

При  $\alpha > 1$  в составе генераторного газа на выходе из подзоны 1.0 присутствует неизрасходованный кислород O<sub>2</sub><sup>изб</sup>. В данной работе полагается, что этот неизрасходованный кислород является причиной дополнительных реакций окисления, локализованных в ПДО. Тогда с учетом наличия подзоны 1.1 конечная концентрация CO на выходе из ОВЗ в общем случае запишется как:

$$[\text{CO}]_{\Sigma,1} = \begin{cases} [\text{CO}]_{0,1.0} & \text{при } \alpha \leq 1; \\ [\text{CO}]_{\Sigma,1.1} & \text{при } \alpha > 1. \end{cases} \quad (8)$$

Концентрации  $[\text{CO}_2]_{\Sigma,1}$ ,  $[\text{H}_2]_{\Sigma,1}$ ,  $[\text{H}_2\text{O}]_{\Sigma,1}$  определяются аналогично (8)

$$[\text{N}_2]_{\Sigma,1} = 100 - ([\text{CO}]_{\Sigma,1} + [\text{CO}_2]_{\Sigma,1} + [\text{H}_2]_{\Sigma,1} + [\text{H}_2\text{O}]_{\Sigma,1}).$$

#### 1.1. Подзона дополнительного окисления избыточным кислородом при $\alpha > 1$

**Реакция 1 ПДО:**  $\text{C} + \text{O}_2 \leftrightarrow \text{CO}_2$ .

Выражение константы равновесия химической реакции 1 и ее численное значение [4, 10–14] запишутся в следующем виде:

$$K_{1,1,1} = \frac{[\text{CO}_2]_{1,1,1}}{[\text{O}_2]_{1,1,1}}; \quad (9)$$

$$\lg K_{1,1,1} = \frac{20582,8}{T} - 0,302 \lg T + 0,143 \cdot 10^{-3} T - 0,24 \cdot 10^{-7} T^2 + 0,622;$$

$$[\text{CO}_2]_{1,1,1} = (R_{\text{CO}_2})_{1,1,1} + a; \quad [\text{O}_2]_{1,1,1} = (R_{\text{O}_2})_{1,1,1} - a,$$

где  $a$  – количество  $\text{O}_2$ , прореагировавшее в реакции 1 ПДО, в % от 100 кмоль газа [15].

Избыточный кислород в ПДО распределяется между четырьмя протекающими реакциями в соответствии с их приоритетом, т. е. пропорционально величине  $\omega_{i,1,1}$ . Тогда начальная концентрация  $\text{O}_2$  для реакции 1 в ПДО

$$(R_{\text{O}_2})_{1,1,1} = [\text{O}_2]_{0,1,0} \omega_{1,1,1}.$$

Начальная концентрация  $\text{CO}_2$  для реакции 1 также берется с учетом доли этой реакции в системе химических превращений ПДО

$$(R_{\text{CO}_2})_{1,1,1} = [\text{CO}_2]_{0,1,0} \omega_{1,1,1}.$$

Результатом решения (9) является искомая величина  $a$ .

**Реакция 2 ПДО:**  $2\text{C} + \text{O}_2 \leftrightarrow 2\text{CO}$ .

Выражение константы равновесия химической реакции 2 и ее численное значение [4, 10–14] запишутся в следующем виде:

$$K_{2,1,1} = \frac{[\text{CO}]_{2,1,1}^2}{[\text{O}_2]_{2,1,1}}; \quad (10)$$

$$\lg K_{2,1,1} = \frac{11635,1}{T} + 2,1656 \lg T - 0,94 \cdot 10^{-3} T - 0,876 \cdot 10^{-6} T^2 + 3,394;$$

$$[\text{CO}]_{2,1,1} = (R_{\text{CO}})_{2,1,1} + 2b; \quad [\text{O}_2]_{2,1,1} = (R_{\text{O}_2})_{2,1,1} - b,$$

где  $b$  – количество  $\text{O}_2$ , прореагировавшее в реакции 2 ПДО, выраженное в % от 100 кмоль газа [15];

$$(R_{\text{O}_2})_{2,1,1} = [\text{O}_2]_{0,1,0} \omega_{2,1,1}.$$

Начальная концентрация  $\text{CO}$  для реакции 2 также берется с учетом доли реакции 2 в системе химических превращений ПДО

$$(R_{\text{CO}})_{2,1,1} = [\text{CO}]_{0,1,0} \omega_{2,1,1}.$$

Результатом решения (10) является искомая величина  $b$ .

**Реакция 3 ПДО:**  $2\text{CO} + \text{O}_2 \leftrightarrow 2\text{CO}_2$ .

Выражение константы равновесия химической реакции и ее численное значение [4, 10–14] запишутся в следующем виде:

$$K_{3,1,1} = \frac{[\text{CO}_2]_{3,1,1}^2}{[\text{CO}]_{3,1,1}^2 \cdot [\text{O}_2]_{3,1,1}}; \quad (11)$$

$$\lg K_{3,1,1} = \frac{29530,5}{T} - 2,769 \lg T + 1,225 \cdot 10^{-3} T - 0,1356 \cdot 10^{-6} T^2 - 2,15;$$

$$[\text{CO}]_{3,1,1} = (R_{\text{CO}})_{3,1,1} - 2d; \quad [\text{O}_2]_{3,1,1} = (R_{\text{O}_2})_{3,1,1} - d;$$

$$[\text{CO}_2]_{3,1,1} = (R_{\text{CO}_2})_{3,1,1} + 2d,$$

где  $d$  – количество  $\text{O}_2$ , прореагировавшее в реакции 3 ПДО, выраженное в % от 100 кмоль газа [15];

$$(R_{\text{O}_2})_{3,1,1} = [\text{O}_2]_{0,1,0} \omega_{3,1,1}.$$

Начальные концентрации всех участвующих в реакции 3 компонентов газа также берутся с учетом доли реакции 3 в системе химических превращений ПДО:

$$(R_{\text{CO}})_{3,1,1} = [\text{CO}]_{0,1,0} \omega_{3,1,1}; \quad (R_{\text{CO}_2})_{3,1,1} = [\text{CO}_2]_{0,1,0} \omega_{3,1,1}.$$

Результатом решения (11) является искомая величина  $d$ .

**Реакция 4 ПДО:**  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \leftrightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ .

Выражение константы равновесия химической реакции и ее численное значение [4, 10–14] запишутся в следующем виде:

$$K_{4,1,1} = \frac{[\text{H}_2\text{O}]_{4,1,1}^2}{[\text{H}_2]_{4,1,1}^2 \cdot [\text{O}_2]_{4,1,1}}; \quad (12)$$

$$\lg K_{4,1,1} = \frac{25116,1}{T} - 0,9466 \lg T - 7,216 \cdot 10^{-4} T + 1,618 \cdot 10^{-7} T^2 - 1,714;$$

$$[\text{H}_2]_{4,1,1} = (R_{\text{H}_2})_{4,1,1} - 2e; \quad [\text{O}_2]_{4,1,1} = (R_{\text{O}_2})_{4,1,1} - e; \quad [\text{H}_2\text{O}]_{4,1,1} = (R_{\text{H}_2\text{O}})_{4,1,1} + 2e,$$

где  $e$  – количество  $\text{O}_2$ , прореагировавшее в реакции 4 ПДО, выраженное в % от 100 кмоль генераторного газа [15];

$$(R_{\text{O}_2})_{4,1,1} = [\text{O}_2]_{0,1,0} \omega_4; \quad (R_{\text{H}_2})_{4,1,1} = [\text{H}_2]_{0,1,0} \omega_4; \quad (R_{\text{H}_2\text{O}})_{4,1,1} = [\text{H}_2\text{O}]_{0,1,0} \omega_4.$$

Результатом решения (12) является искомая величина  $e$ .

Вычисление итоговой конечной концентрации CO на выходе из ПДО производится по следующей зависимости:

$$[\text{CO}]_{\Sigma,1.1} = [\text{CO}]_{0,1.0} - \sum_{i=1}^{i=4} (R_{\text{CO}})_{i,1.1} + \sum_{i=1}^{i=4} [\text{CO}]_{i,1.1}.$$

Аналогично вычисляются  $[\text{CO}_2]_{\Sigma,1.1}$ ,  $[\text{H}_2]_{\Sigma,1.1}$  и  $[\text{H}_2\text{O}]_{\Sigma,1.1}$

$$[\text{N}_2]_{\Sigma,1.1} = 100 - \left( [\text{CO}]_{\Sigma,1.1} + [\text{CO}_2]_{\Sigma,1.1} + [\text{H}_2]_{\Sigma,1.1} + [\text{H}_2\text{O}]_{\Sigma,1.1} \right).$$

## 2. Восстановительная зона

**Реакция 1 ВЗ:**  $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \leftrightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$ .

Выражение константы равновесия химической реакции и ее численное значение [4, 10–14] запишутся в следующем виде:

$$K_{1,2} = \frac{[\text{CO}]_{1,2} \cdot [\text{H}_2\text{O}]_{1,2}}{[\text{CO}_2]_{1,2} \cdot [\text{H}_2]_{1,2}}; \quad (13)$$

$$\lg K_{1,2} = -\frac{2207,2}{T} + 0,9115 \lg T - 9,738 \cdot 10^{-4} T + 1,487 \cdot 10^{-7} T^2 + 0,098;$$

$$[\text{CO}_2]_{1,2} = (R_{\text{CO}_2})_{1,2} - f; \quad [\text{H}_2]_{1,2} = (R_{\text{H}_2})_{1,2} - f;$$

$$[\text{CO}]_{1,2} = (R_{\text{CO}})_{1,2} + f; \quad [\text{H}_2\text{O}]_{1,2} = (R_{\text{H}_2\text{O}})_{1,2} + f,$$

где  $f$  – количество  $\text{H}_2$ , прореагировавшее в реакции 1 ВЗ, выраженное в % от 100 кмоль генераторного газа [15].

Начальные концентрации всех компонентов газа, участвующих в  $i$ -й реакции ВЗ, берутся на выходе из ОВЗ с учетом доли данной реакции в системе химических превращений ВЗ, т. е. пропорционально величине  $\omega_{i,2}$ :

$$(R_{\text{CO}_2})_{1,2} = [\text{CO}_2]_{\Sigma,1} \omega_{1,2}; \quad (R_{\text{H}_2})_{1,2} = [\text{H}_2]_{\Sigma,1} \omega_{1,2};$$

$$(R_{\text{CO}})_{1,2} = [\text{CO}]_{\Sigma,1} \omega_{1,2}; \quad (R_{\text{H}_2\text{O}})_{1,2} = [\text{H}_2\text{O}]_{\Sigma,1} \omega_{1,2}.$$

Результатом решения (13) является искомая величина  $f$ .

**Реакция 2 ВЗ:**  $\text{C} + \text{CO}_2 \leftrightarrow 2\text{CO}$ .

Выражение константы равновесия химической реакции и ее численное значение [4, 10–14] запишутся в следующем виде:

$$K_{2,2} = \frac{[\text{CO}]_{2,2}^2}{[\text{CO}_2]_{2,2}}; \quad (14)$$

$$\lg K_{2,2} = -\frac{8947,7}{T} + 2,4673 \lg T - 1,0824 \cdot 10^{-3} T + 0,116 \cdot 10^{-6} T^2 + 2,772;$$

$$[\text{CO}_2]_{2,2} = (R_{\text{CO}_2})_{2,2} - g; \quad [\text{CO}]_{2,2} = (R_{\text{CO}})_{2,2} + 2g,$$

где  $g$  – количество  $\text{CO}_2$ , прореагировавшее в реакции 2 ВЗ, выраженное в % от 100 кмоль генераторного газа [15];

$$(R_{\text{CO}_2})_{2,2} = [\text{CO}_2]_{\Sigma,1} \omega_{2,2}; \quad (R_{\text{CO}})_{2,2} = [\text{CO}]_{\Sigma,1} \omega_{2,2}.$$

Результатом совместного решения (14) является искомая величина  $g$ .

**Реакция 3 ВЗ:**  $\text{C} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO} + \text{H}_2$ .

Выражение константы равновесия химической реакции и ее численное значение [4, 10–14] запишутся в следующем виде:

$$K_{3,2} = \frac{[\text{CO}]_{3,2} \cdot [\text{H}_2]_{3,2}}{[\text{H}_2\text{O}]_{3,2}}; \quad (15)$$

$$\lg K_{3,2} = -\frac{6740,5}{T} + 1,5561 \lg T - 1,092 \cdot 10^{-4} T - 0,37 \cdot 10^{-7} T^2 + 2,554;$$

$$\text{H}[\text{H}_2\text{O}]_{3,2} = (R_{\text{H}_2\text{O}})_{3,2} - h; \quad [\text{CO}]_{3,2} = (R_{\text{CO}})_{3,2} + h; \quad [\text{H}_2]_{3,2} = (R_{\text{H}_2})_{3,2} + h,$$

где  $h$  – количество  $\text{H}_2\text{O}$ , прореагировавшее в реакции 3 ВЗ, выраженное в % от 100 кмоль генераторного газа [15];

$$(R_{\text{H}_2\text{O}})_{3,2} = [\text{H}_2\text{O}]_{\Sigma,1} \omega_{3,2}; \quad (R_{\text{CO}})_{3,2} = [\text{CO}]_{\Sigma,1} \omega_{3,2}; \quad (R_{\text{H}_2})_{3,2} = [\text{H}_2]_{\Sigma,1} \omega_{3,2}.$$

Результатом решения (15) является искомая величина  $h$ .

**Реакция 4 ВЗ:**  $\text{C} + 2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2$ .

Выражение константы равновесия химической реакции и ее численное значение [4, 10–14] запишутся в следующем виде:

$$K_{4,2} = \frac{[\text{CO}_2]_{4,2} \cdot [\text{H}_2]_{4,2}^2}{[\text{H}_2\text{O}]_{4,2}^2}; \quad (16)$$

$$\lg K_{4,2} = -\frac{4533,3}{T} + 0,6446 \lg T + 8,616 \cdot 10^{-4} T - 1,858 \cdot 10^{-7} T^2 + 2,336;$$

$$[\text{H}_2\text{O}]_{4,2} = (R_{\text{H}_2\text{O}})_{4,2} - 2j; \quad [\text{CO}_2]_{4,2} = (R_{\text{CO}_2})_{4,2} + j; \quad [\text{H}_2]_{4,2} = (R_{\text{H}_2})_{4,2} + 2j,$$

где  $2j$  – количество  $\text{H}_2\text{O}$ , прореагировавшее в реакции 4 ВЗ, выраженное в % от 100 кмоль генераторного газа [15];

$$(R_{H_2O})_{4,2} = [H_2O]_{\Sigma,1} \omega_{4,2}; \quad (R_{CO_2})_{4,2} = [CO_2]_{\Sigma,1} \omega_{4,2}; \quad (R_{H_2})_{4,2} = [H_2]_{\Sigma,1} \omega_{4,2}.$$

Результатом решения (16) является искомая величина  $j$ .

Для вычисления конечного значения компонента генераторного газа CO на выходе из восстановительной зоны использована следующая зависимость:

$$[CO]_{\Sigma,2} = [CO]_{\Sigma,1} - \sum_{i=1}^{i=4} (R_{CO})_{i,2} + \sum_{i=1}^{i=4} [CO]_{i,2}.$$

Аналогично вычисляются  $[CO_2]_{\Sigma,2}$ ,  $[H_2]_{\Sigma,2}$ ,  $[H_2O]_{\Sigma,2}$

$$[N_2]_{\Sigma,2} = 100 - ([CO]_{\Sigma,2} + [CO_2]_{\Sigma,2} + [H_2]_{\Sigma,2} + [H_2O]_{\Sigma,2}).$$

### 3. Зона взаимодействия продуктов между собой и с углеродом топлива

**Реакция 1 ЗВП:**  $CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$ .

Выражение константы равновесия химической реакции и ее численное значение [4, 10–14] запишутся в следующем виде:

$$K_{1,3} = \frac{[CO_2]_{1,3} \cdot [H_2]_{1,3}}{[CO]_{1,3} \cdot [H_2O]_{1,3}}; \tag{17}$$

$$\lg K_{1,3} = \frac{2207,2}{T} - 0,9115 \lg T + 9,738 \cdot 10^{-4} T - 1,487 \cdot 10^{-7} T^2 - 0,098;$$

$$[CO]_{1,3} = (R_{CO})_{1,3} - k; \quad [H_2O]_{1,3} = (R_{H_2O})_{1,3} - k;$$

$$[CO_2]_{1,3} = (R_{CO_2})_{1,3} + k; \quad [H_2]_{1,3} = (R_{H_2})_{1,3} + k,$$

где  $k$  – количество  $H_2O$ , прореагировавшее в реакции 1 ЗВП, выраженное в процентах от 100 кмоль генераторного газа [15].

Начальные концентрации всех компонентов  $i$ -й реакции ЗВП берутся на выходе из ВЗ с учетом доли данной реакции в системе химических превращений ЗВП, т. е. пропорционально величине  $\omega_{i,3}$ :

$$(R_{CO})_{1,3} = [CO]_{\Sigma,2} \omega_{1,3}; \quad (R_{H_2O})_{1,3} = [H_2O]_{\Sigma,2} \omega_{1,3};$$

$$(R_{CO_2})_{1,3} = [CO_2]_{\Sigma,2} \omega_{1,3}; \quad (R_{H_2})_{1,3} = [H_2]_{\Sigma,2} \omega_{1,3}.$$

Результатом решения (17) является искомая величина  $k$ .

**Реакция 2 ЗВП:**  $C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4$ .

Выражение константы равновесия химической реакции и ее численное значение [4, 10–14] запишутся в следующем виде:

$$K_{2,3} = \frac{[CH_4]_{2,3}}{[H_2]_{2,3}^2}; \quad (18)$$

$$\lg K_{2,3} = \frac{3348}{T} - 5,57 \lg T + 0,186 \cdot 10^{-2} T - 1,095 \cdot 10^{-7} T^2 + 11,79;$$

$$[H_2]_{2,3} = (R_{H_2})_{2,3} - 2m; \quad [CH_4]_{2,3} = (R_{CH_4})_{2,3} + m,$$

где  $2m$  – количество  $H_2$ , прореагировавшее в реакции 2 ЗВП, выраженное в % от 100 кмоль генераторного газа [15];

$$(R_{H_2})_{2,3} = [H_2]_{\Sigma,2} \omega_{2,3}; \quad (R_{CH_4})_{2,3} = [CH_4]_{\Sigma,2} \omega_{2,3}.$$

Поскольку метан  $CH_4$  отсутствует среди компонентов генераторного газа в ОВЗ и ВЗ, то  $(R_{CH_4})_{2,3} = 0$ .

Результатом решения (18) является искомая величина  $m$ .

**Реакция 3 ЗВП:**  $CO + 3H_2 \leftrightarrow CH_4 + H_2O$ .

Выражение константы равновесия химической реакции и ее численное значение [4, 10–14] запишутся в следующем виде:

$$K_{3,3} = \frac{[CH_4]_{3,3} \cdot [H_2O]_{3,3}}{[CO]_{3,3} \cdot [H_2]_{3,3}^3}; \quad (19)$$

$$\lg K_{3,3} = \frac{9874}{T} - 7,14 \lg T + 0,188 \cdot 10^{-2} T - 0,094 \cdot 10^{-6} T^2 + 8,64;$$

$$[H_2]_{3,3} = (R_{H_2})_{3,3} - 3n; \quad [CO]_{3,3} = (R_{CO})_{3,3} - n;$$

$$[CH_4]_{3,3} = (R_{CH_4})_{3,3} + n; \quad [H_2O]_{3,3} = (R_{H_2O})_{3,3} + n,$$

где  $3n$  – количество  $H_2$ , прореагировавшее в реакции 3 ЗВП, выраженное в % от 100 кмоль генераторного газа [15];

$$(R_{CO})_{3,3} = [CO]_{\Sigma,2} \omega_{3,3}; \quad (R_{H_2})_{3,3} = [H_2]_{\Sigma,2} \omega_{3,3};$$

$$(R_{CH_4})_{3,3} = [CH_4]_{\Sigma,2} \omega_{3,3}; \quad (R_{H_2O})_{3,3} = [H_2O]_{\Sigma,2} \omega_{3,3}.$$

Поскольку метан  $CH_4$  отсутствует среди компонентов генераторного газа в ОВЗ и ВЗ, то  $(R_{CH_4})_{3,3} = 0$ .

Результатом решения (19) является искомая величина  $n$ .

**Реакция 4 ЗВП:**  $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \leftrightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ .

Выражение константы равновесия химической реакции и ее численное значение [4, 10–14] запишутся в следующем виде:

$$K_{4,3} = \frac{[\text{CH}_4]_{4,3} \cdot [\text{H}_2\text{O}]_{4,3}^2}{[\text{CO}]_{4,3} \cdot [\text{H}_2]_{4,3}^4}; \quad (20)$$

$$\lg K_{4,3} = \frac{7674}{T} - 6,23 \lg T + 0,906 \cdot 10^{-3} T + 0,596 \cdot 10^{-7} T^2 + 8,79;$$

$$[\text{H}_2]_{4,3} = (R_{\text{H}_2})_{4,3} - 4p; \quad [\text{CO}_2]_{4,3} = (R_{\text{CO}_2})_{4,3} - p;$$

$$[\text{CH}_4]_{4,3} = (R_{\text{CH}_4})_{4,3} + p; \quad [\text{H}_2\text{O}]_{4,3} = (R_{\text{H}_2\text{O}})_{4,3} + 2p,$$

где  $4p$  – количество  $\text{H}_2$ , прореагировавшее в реакции 4 ЗВП, выраженное в % от 100 кмоль генераторного газа [15];

$$(R_{\text{CO}_2})_{4,3} = [\text{CO}_2]_{\Sigma,2} \omega_{4,3}; \quad (R_{\text{H}_2})_{4,3} = [\text{H}_2]_{\Sigma,2} \omega_{4,3};$$

$$(R_{\text{CH}_4})_{4,3} = [\text{CH}_4]_{\Sigma,2} \omega_{4,3}; \quad (R_{\text{H}_2\text{O}})_{4,3} = [\text{H}_2\text{O}]_{\Sigma,2} \omega_{4,3}.$$

Поскольку метан  $\text{CH}_4$  отсутствует среди компонентов генераторного газа в ОВЗ и ВЗ, то  $(R_{\text{CH}_4})_{4,3} = 0$ .

Результатом решения (20) является искомая величина  $p$ .

Для вычисления конечного значения компонента генераторного газа  $\text{CO}$  на выходе из зоны взаимодействия продуктов между собой и углеродом топлива использовано следующее выражение:

$$[\text{CO}]_{\Sigma,3} = [\text{CO}]_{\Sigma,2} - \sum_{i=1}^{i=4} (R_{\text{CO}})_{i,3} + \sum_{i=1}^{i=4} [\text{CO}]_{i,3}.$$

Аналогично вычисляются  $[\text{CO}_2]_{\Sigma,3}$ ,  $[\text{H}_2]_{\Sigma,3}$ ,  $[\text{H}_2\text{O}]_{\Sigma,3}$

$$[\text{N}_2]_{\Sigma,3} = 100 - ([\text{CO}]_{\Sigma,3} + [\text{CO}_2]_{\Sigma,3} + [\text{H}_2]_{\Sigma,3} + [\text{H}_2\text{O}]_{\Sigma,3}).$$

Результаты расчетов по разработанному методу сравнивались с данными газового анализа сухого состава генераторного газа и приведены в табл. 3. Сравнение расчетных и опытных данных осуществлялось при одинаковых значениях содержания азота  $\text{N}_2$ , не участвующего ни в одной из химических реакций. Данные опытов Д. Б. Гинзбурга [3] по газификации березы влажностью 28 % (табл. 1) сопоставлялись с результатами расчетов по разработанному методу при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 0,33$ . Получено приемлемое совпадение расчетных и опытных значений состава генераторного газа по всем его компонентам.

Таблица 3

Сухой состав генераторного газа из березы влажностью 28 %  
по разработанному методу\*

The dry composition of the generator gas produced from birch with moisture 28 %  
calculated by this method\*

$\alpha$	CO, %	CO <sub>2</sub> , %	H <sub>2</sub> , %	O <sub>2</sub> , %	CH <sub>4</sub> , %	N <sub>2</sub> , %	Q <sub>н</sub> <sup>p</sup> , кДж/м <sup>3</sup>
0,1	35,36	10,79	14,45	0,00	6,40	33,00	8353
0,2	30,88	9,18	12,44	0,00	5,61	41,89	7282
0,3	27,41	7,96	10,87	0,00	5,01	48,75	6456
0,31	27,10	7,86	10,73	0,00	4,96	49,36	6383
0,32	26,81	7,76	10,60	0,00	4,90	49,93	6313
0,33	26,52	7,66	10,47	0,00	4,85	50,50	6244
0,34	26,23	7,56	10,33	0,00	4,81	51,07	6176
0,35	25,95	7,47	10,21	0,00	4,76	51,61	6110
0,4	24,65	7,03	9,62	0,00	4,54	54,17	5801
0,5	22,40	6,28	8,60	0,00	4,16	58,57	5269
0,6	20,49	5,60	7,53	0,00	3,89	62,49	4813
0,7	18,91	5,10	6,81	0,00	3,63	65,55	4442
0,8	17,27	4,65	5,60	0,00	3,58	68,90	4083
0,9	16,15	4,29	5,16	0,00	3,36	71,04	3816
1,0	15,10	3,98	4,61	0,00	3,22	73,09	3573
1,2	15,66	5,03	4,40	0,00	2,53	72,39	3375
1,4	15,61	5,14	3,25	0,00	2,27	73,73	3154
1,6	15,98	5,20	2,62	0,00	2,11	74,09	3077
1,8	16,34	5,38	2,56	0,00	1,89	73,83	3036
2,0	16,62	5,46	2,32	0,00	1,74	73,86	2993
3,0	17,43	5,54	1,07	0,00	1,39	74,57	2836

\*Температура воздуха 283 К, относительная влажность воздуха 70 %. Температуры по зонам [5]: окислительно-восстановительная 1500 К, восстановительная 1275 К, зона взаимодействия продуктов друг с другом и углеродом топлива 950 К.

### ВЫВОДЫ

1. Предложен новый метод расчета состава древесного генераторного газа, представляющий совокупность модифицированного общепринятого балансового метода [2] и добавленного метода расчета концентраций продуктов химических реакций по константам равновесия этих реакций в активных зонах газификации с различными температурами. В данном методе различают не одну, а три активные зоны газификации: окислительно-восстановительную, восстановительную и зону взаимодействия продуктов газификации между собой и с углеродом вновь поступающего нагретого топлива. В материальном и тепловом балансе устранены основные недостатки общепринятого метода [2].

2. По величине изменения свободной энтальпии (энергии Гиббса) ряда химических реакций процесса газификации древесины проведена оценка

химического сродства реагентов, выявлены преобладающие (основные) химические реакции, установлен их приоритет в конкретных температурных условиях (активных зонах) и найдены доли этих реакций в системе химических превращений.

3. Метод расчета концентраций продуктов химических реакций по константам равновесия этих реакций позволяет определять концентрации продуктов основных химических реакций в каждой из активных зон по начальным концентрациям исходных веществ или их соединений (газов), температуре и константам равновесия этих реакций.

4. Разработанный метод расчета компонентов генераторного газа, состоящий из балансового метода (материальный и тепловой балансы) и метода расчета концентраций продуктов химических реакций по константам равновесия этих реакций, позволяет более достоверно моделировать процесс газификации древесного топлива в газогенераторе обращенного процесса и получать приемлемое согласование расчетных и опытных данных по составу генераторного газа.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Газогенератор твердого топлива: пат. 2579112 РФ, МПК F23G5/027, C10J3/00 / Е. М. Кашин, В. Н. Диденко; опубл. 27.03.2016.
2. Юдушкин, Н. Г. Газогенераторные тракторы. Теория, конструкция и расчет / Н. Г. Юдушкин. М.: Гос. науч.-техн. изд-во машиностроит. лит-ры, 1955. 244 с.
3. Гинзбург, Д. Б. Газификация низкосортного топлива / Д. Б. Гинзбург. М.: Гос. изд-во лит-ры по строит. матер., 1950. 173 с.
4. Федосеев, С. Д. Полукоксование и газификация твердого топлива / С. Д. Федосеев, А. Б. Чернышев. М.: Гос. науч.-техн. изд-во нефтян. горно-топлив. лит-ры, 1960. 327 с.
5. Коллеров, Л. К. Газомоторные установки / Л. К. Коллеров. М., СПб.: Гос. науч.-техн. изд-во машиностроит. лит-ры, 1951. 240 с.
6. Лямин, В. А. Газификация древесины / В. А. Лямин. М.: Лесная промышленность, 1967. 263 с.
7. Равдель, А. А. Краткий справочник физико-химических величин / А. А. Равдель, А. М. Пономарева. 8-е изд., перераб. Л.: Химия, 1983. 232 с.
8. Головков, С. И. Энергетическое использование древесных отходов / С. И. Головков, И. Ф. Коперин, В. И. Найденов. М.: Лесная промышленность, 1987. 221 с.
9. Токарев, Г. Г. Газогенераторные автомобили / Г. Г. Токарев. М.: МАШГИЗ, 1955. 204 с.
10. Дешалит, Г. И. Расчеты процессов газификации топлив / Г. И. Дешалит. Харьков: Изд-во Харьковского Ордена Трудового Красного Знамени гос. ун-та имени А. М. Горького, 1959. 167 с.
11. Богданов, Н. Н. Полукоксование и газификация торфа / Н. Н. Богданов. М.; Л.: Гос. энергетич. изд-во, 1947. 271 с.
12. Лавров, Н. В. Физико-химические основы горения и газификации топлива / Н. В. Лавров. М.: Гос. науч.-техн. изд-во по черной и цветной металлургии, 1957. 289 с.
13. Лавров, Н. В. Введение в теорию горения и газификации топлива / Н. В. Лавров, А. П. Шуригин. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1962. 217 с.
14. Совершенствование техники и технологии процесса газификации высоковлажных древесных отходов / Н. Ф. Тимербаев [и др.]. Казань: Изд-во КНИТУ, 2013. 92 с.

15. Иноземцев, Н. В. Основы термодинамики и кинетики химических реакций / Н. В. Иноземцев. М.: Военная Академия механизации и моторизации Красной Армии имени Сталина, 1940. 257 с.

Поступила 18.05.2018 Подписана в печать 27.02.2019 Опубликована онлайн 31.07.2019

#### REFERENCES

1. Kashin E. M., Didenko V. N. (2016) *The Gasifier of Solid Fuel*. Patent No 2579112 of the Russian Federation (in Russian).
2. Yudushkin N. G. (1955) *Gas Generator Tractors. Theory, Design, Calculation*. Moscow, State Scientific-and-Technical Publishing House of Mechanical Engineering Literature. 244 (in Russian).
3. Ginzburg D. B. (1950) *The Gasification of Low-Grade Fuel*. Moscow, State Publishing House of Literature on Construction Materials. 173 (in Russian).
4. Fedoseev S. D., Chernyshev A. B. (1960) *Semi-Coking and Gasification of Solid Fuel*. Moscow, State Scientific-and-Technical Publishing House of Oil and Mine Fuel Literature. 327 (in Russian).
5. Kollerov L. K. (1951) *Gas Engine Installations*. Sankt-Petersburg, State Scientific-and-Technical Publishing House of Mechanical Engineering Literature. 240 (in Russian).
6. Lyamin V. A. (1967) *Wood Gasification*. Moscow, Lesnaya Promyshlennost' Publ. 263 (in Russian).
7. Ravdel' A. A., Ponomareva A. M. (1983) *Concise Reference Book of Physical and Chemical Magnitudes*. 8<sup>th</sup> ed. Leningrad, Khimiya Publ. 232 (in Russian).
8. Golovkov S. I., Koperin I. F., Naidenov V. I. (1987) *Energy Use of Wood Waste*. Moscow, Lesnaya Promyshlennost' Publ. 221 (in Russian).
9. Tokarev G. G. (1955) *Gas Generator Automobiles*. Moscow, MASHGIZ Publ. 204 (in Russian).
10. Deshalit G. I. (1959) *The Calculations of the Fuel Gasification Processes*. Kharkov, Publishing House of the Kharkiv Labour Red Banner Order State University named after A. M. Gor-ky. 167 (in Russian).
11. Bogdanov N. N. (1947) *Semi-Coking and Gasification of Peat*. Moscow, Leningrad, State Power Engineering Publ. 271 (in Russian).
12. Lavrov N. V. (1957) *Physical and Chemical Bases of Combustion and Gasification of Fuel*. Moscow, State Scientific-and-Technical Publishing House of Ferrous and Nonferrous Metallurgy. 289 (in Russian).
13. Lavrov N. V., Shurigin A. P. (1962) *Introduction to the Theory of Combustion and Gasification of Fuel*. Moscow, Publishing House of USSR Academy of Sciences. 217 (in Russian).
14. Timerbaev N. F., Safin R. G., Hisameeva A. R., Ishakov T. D. (2013) *Improvement of the Equipment and Technology of Gasification Process of High-Moist Wood Waste*. Kazan, KNITU Publ. 92 (in Russian).
15. Inozemtsev N. V. (1940) *Basics of Thermodynamics and Kinetics of Chemical Reactions*. Moscow, Military Red Army Mechanization and Motorization Academy named after Stalin. 257 (in Russian).

Received: 18 May 2018

Accepted: 27 February 2019

Published online: 31 July 2019