

## ТЕРОМОГАЗОГЕНЕРАЦИЯ ГОРЮЧИХ ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ

Наиболее научно и технически разработанными способами энергетического использования древесного топлива является его прямое сжигание в топках и пиролиз. Особо привлекателен второй метод, так как он является экологически чистым и более полно использует энергетический потенциал твердых топлив.

Пиролиз – это процесс, при котором органическое сырье подвергают нагреву без кислорода или при недостаточном его доступе для получения производных топлив (твердых, жидких и газообразных). Изначальным сырьем могут служить древесина, уголь, сланец, отходы сельскохозяйственной деятельности, бытовой мусор. Продуктами пиролиза являются газы, жидкий конденсат в виде смол и масел, твердые остатки в виде угля и золы.

Материальный баланс пиролиза топлива без доступа кислорода имеет следующий вид:

$$B = G_{\text{пара}} + G_{\text{г.г}} + G_{\text{тв.ост}},$$

где  $B$  – расход топлива, подвергаемый пиролизу, кг/с;  $G_{\text{пара}}$  – выход пара в процессе пиролиза, кг/с;  $G_{\text{г.г}}$  – выход генераторного газа, кг/с;  $G_{\text{тв.ост}}$  – выход твердого остатка, кг/с.

В удельных величинах на единицу веса топлива, материальный баланс примет вид:

$$1 = g_{\text{пара}} + g_{\text{г.г}} + g_{\text{тв.ост}};$$

$$g_{\text{пара}} = W^p / 100, \quad g_{\text{г.г}} = g_{\text{г.г}}^0 \left( 1 - \frac{W^p}{100} - \frac{A^p}{100} \right),$$

$$g_{\text{тв.ост}} = \left( 1 - g_{\text{г.г}}^0 \right) \left( 1 - \frac{W^p}{100} - \frac{A^p}{100} \right) + \frac{A^p}{100},$$

где  $W^p$ ,  $A^p$  – рабочая влажность и зольность исходного топлива, %;  $g_{\text{г.г}}^0 = (0,85 - \exp(1,2 - t_r / 143))$  – удельный выход генераторного газа для абсолютно сухого и беззольного топлива (зависимость Леонтьева);  $t_r$  – температура пиролиза, °С.

Уравнение теплового баланса пиролиза топлива без доступа кислорода имеет вид:

$$Q_{\text{н}}^p + Q_{\text{пир}} = g_{\text{г.г}} Q_{\text{н}}^{\text{г.г}} + Q_{\text{ф.г}}^{\text{г.г}} + g_{\text{тв.ост}} Q_{\text{н}}^{\text{тв.ост}} + Q_{\text{ф.г}}^{\text{тв.ост}},$$

где  $Q_{\text{н}}^p$  – низшая рабочая теплота сгорания топлива, кДж/кг;  $Q_{\text{пир}}$  – теплота, которую необходимо подвести к топливу для осуществления пиролиза, кДж/кг;  $Q_{\text{н}}^{\text{г.г}}$ ,  $Q_{\text{н}}^{\text{тв.ост}}$  – теплота сгорания генераторного газа и твердого

остатка, кДж/кг;  $Q_{ф.г}^{г.г}$ ,  $Q_{ф.г}^{тв.ост}$  – физическая теплота генераторного газа и твердого остатка, полученная в процессе пиролиза, кВт.

Физическую теплоту генераторного газа и твердого остатка можно определить по формулам:

$$Q_{ф.г}^{г.г} = c_{г} g_{г.г} (t_{г} - t_0) + c_{пара} g_{пара} (t_{г} - t_0) + r g_{пара};$$

$$Q_{г}^{тв.ост} = c_{тв} g_{тв.ост} (t_{г} - t_0),$$

где  $c_{г}$ ,  $c_{пара}$ ,  $c_{тв}$  – средняя теплоемкость генераторного газа, пара и твердого остатка, кДж/(кг·°С);  $r$  – теплота парообразования воды, кДж/кг;  $t_0$  – начальная температура топлива, °С.

Газификация – это пиролиз, проведенный с целью максимального получения производного газообразного топлива. Устройства для частичного сжигания биомассы, проектируемые на получение максимального выхода горючих газов, называются газогенераторами.

Существуют различные схемы газогенераторных процессов. К более простым относятся слоевые. Слоевая газификация может происходить при встречной подаче воздуха и топлива – прямой процесс (рис. 3.1, а), попутной подаче топлива и воздуха сверху – обращенный процесс (рис. 3.1, б) и смешанный (рис. 3.1, в) процессы.

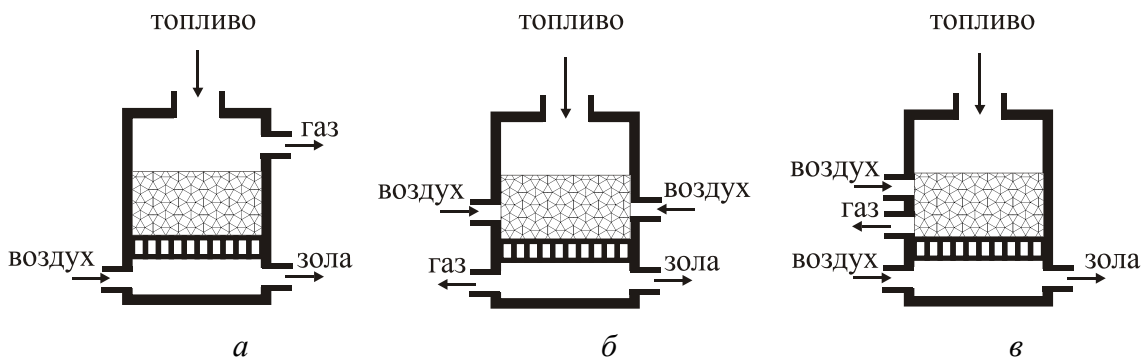


Рис. 3.1. Слоевые схемы газификации:  
– прямой (а), обращенный (б) и смешанный (в) процессы газификации

Основные параметры слоевых газогенераторов:

1. Диаметр камеры газогенератора, м:

$$D_{к} = \sqrt{\frac{B}{q}},$$

где  $q$  – напряженность горения, кг/(м<sup>2</sup>·с).

2. Высота активной зоны, м:

$$H = \frac{v_{к} Q_{н}^p B}{D_{к}^2},$$

где  $v_{к}$  – удельный объем камеры газификации, м<sup>3</sup>/МВт.

Материальный баланс полной газификации топлива с недостатком воздуха ( $\alpha < 1$ ) имеет вид:

$$B + \alpha G_B^0 = G_{г.г} + G_{зо́лы};$$

$$1 + \alpha m_B^0 = g_{г.г} + A^p / 100,$$

где  $m_B^0$  – теоретическое необходимое количество воздуха на 1 кг топлива для полного его сгорания.

Энергетический баланс полной газификации топлива имеет вид:

$$Q_H^p + Q_{ф.г}^{возд} = g_{г.г} Q_H^{г.г} + Q_{ф.г}^{г.г} + Q_{ф.г}^{зо́лы},$$

где  $Q_{ф.г}^{возд} = c_{возд} \alpha m_B^0 (t_{возд} - t_0)$  – физическая теплота подаваемого на горение воздуха, кВт;  $Q_{ф.г}^{г.г} = c_{г.г} g_{г.г} (t_{г.г} - t_0)$ ,  $Q_{ф.г}^{зо́лы} = c_{зо́лы} (t_{г.г} - t_0) A^p / 100$  – физическая теплота генераторного газа и золы, полученная в процессе газификации, кВт.

Энергетическая эффективность газификации определяется тепловым КПД:

$$\eta_T = (g_{г.г} Q_H^{г.г} + Q_{ф.г}^{г.г}) / Q_H^p,$$

а качество проведенной газификации определяется химическим КПД:

$$\eta_{хим} = g_{г.г} Q_H^{г.г} / Q_H^p.$$

При температуре газификации древесного топлива  $t_{г.г} = 900^\circ\text{C}$  минимально необходимое значение коэффициента недостатка воздуха определяется по формуле:

$$\alpha_{газ} = 0,196 \frac{1 + 0,84\varphi}{1 - 0,92\varphi},$$

где  $\varphi = W^p / 100$  – относительная влажность топлива.

Содержание азота в генераторном газе, %

$$N_{г.г} = (\alpha m_B^0 \cdot 0,77 + N_T^p / 100) / g_{г.г} \frac{\rho_{г.г}}{\rho_N} \cdot 100,$$

где  $N_T^p$  – содержание азота в топливе, %;  $\rho_{г.г}$  – плотность генераторного газа, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_N$  – плотность генераторного азота, кг/м<sup>3</sup>.

Низшая теплота сгорания генераторного газа, МДж/м<sup>3</sup>

$$Q_H^{г.г} = 0,127 \text{CO} + 0,108 \text{H}_2 + 0,358 \text{CH}_4.$$

Газификация топлива твердым высокотемпературным теплоносителем заключается в том, что топливо предварительно проходит грохочение и дробление в дробилке, после чего подается в сушилку для сушки горячим паром из котла-утилизатора (рис. 3.2). Раздробленное до определенного размера и высушенное топливо смешивается с высокотемпературным (800–850<sup>o</sup>C) теплоносителем, которым является собственная зола топлива, и подается во вращающийся реактор пиролиза. Здесь топливо нагревается при отсутствии кислорода до температуры 460–490<sup>o</sup>C, и из него выделяется

парогазовая смесь, содержащая пары углеводородов, неконденсирующиеся газы ( $H_2$ ,  $CO$ ,  $N_2$ ,  $H_2S$ ,  $CH_4$  и др.) и коксозольный остаток.

Парогазовые продукты термического разложения топлива проходят через очистку от пыли в пылевой камере и отводятся в конденсационное устройство, где пары углеводородов конденсируются, образуя смолу. Неконденсирующийся полукоксовый газ пригоден в качестве газотурбинного либо котельного топлива. Коксовый остаток отводится из реактора пиролиза в аэрофонтанную топку, где его органические составляющие дожигаются в потоке воздуха. Выделившееся при этом тепло используется для нагрева золы-теплоносителя и для производства пара в котле-утилизаторе. Пар расходуется на собственные технологические и другие нужды. Важным этапом переработки топлива является утилизация тепла отбираемой из топки золы, что позволяет повысить КПД процесса на 8–10%.

Важными показателями эффективности переработки являются доли потенциального тепла топлива:  $q_{\text{пгс}}$  – переходящая в парогазовую смесь и  $q_{\text{кзо}}$  – остающаяся в коксозольном остатке. Чем больше  $q_{\text{пгс}}$ , тем больше высококалорийного топлива (смола + газ) можно получить из топлива:

$$q_{\text{пгс}} = 100\% - q_{\text{кзо}} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{\text{пр}}}{\sum Q_c},$$

где  $\sum_{i=1}^n Q_{\text{пр}}$  – теплота сгорания продуктов разложения (парогазовой смеси);  $n$  – число продуктов;  $\sum Q_c$  – суммарная теплота топлива.

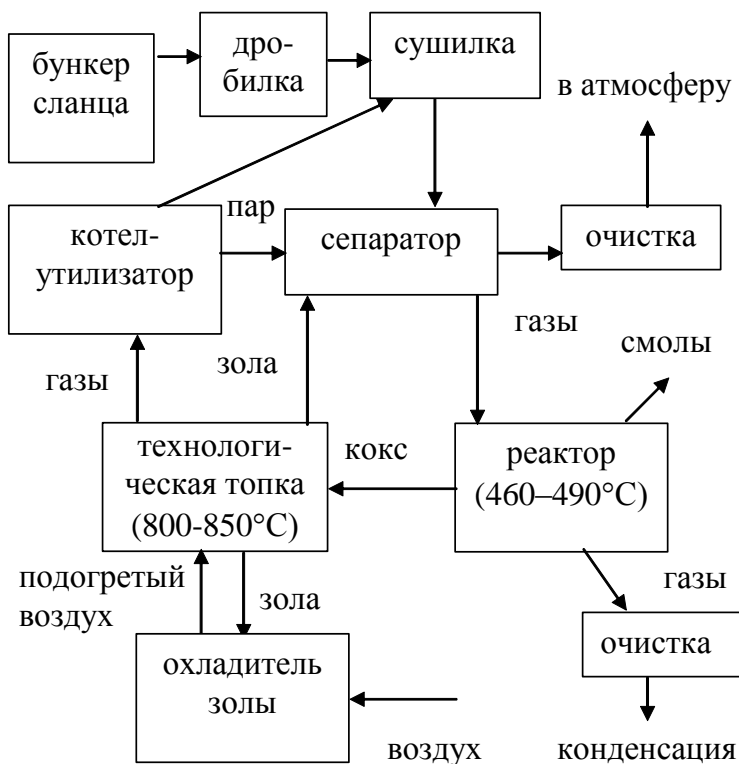


Рис. 3.2. Технологическая схема установки термического разложения сланца

Для введения процесса термического разложения топлива требуется дополнительная энергия (электрическая, механическая и др.). Кроме того, в установке избыточное тепло процесса используется для получения пара для собственных нужд в котле-утилизаторе. Тогда степень эффективности извлечения органического вещества из топлива необходимо определять по энергетическому коэффициенту использования:

$$\eta_{\text{э}} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{\text{пр}} + \sum Q_{\text{э.п}}}{\sum Q_{\text{с}} + \sum Q_{\text{э.р}}},$$

где  $\sum Q_{\text{э.п}}$  – общая теплота дополнительных энергетических продуктов (пара, воды, воздуха и т. д.);  $\sum Q_{\text{э.р}}$  – энергия, потребляемая для термического разложения топлива.

### Задачи для практических занятий

#### Задача 3.1

Пиролиз топлива составом  $C^P = 18 + N\%$ ,  $H^P = 5,1\%$ ,  $S^P = 0,2\%$ ,  $N^P = 0,9\%$ ,  $O^P = 39\%$ ,  $A^P = 1,8\%$ ,  $W^P = 35 - N\%$  производился без доступа кислорода. Состав летучих  $CO = 66 + 0,5 \cdot N\%$ ,  $H_2 = 26 - 0,5 \cdot N\%$ ,  $CH_4 = 8\%$ . Теплоту сгорания твердого остатка 40 МДж/кг. Определить теплоту, необходимую подвести для осуществления пиролиза при температура  $900 + 5 \cdot N^{\circ}C$ . Температура окружающей среды  $25^{\circ}C$ .

#### Задача 3.2

Состав топлива в газогенераторе  $C^P = 32 + N\%$ ,  $H^P = 5,1\%$ ,  $S^P = 0,2\%$ ,  $N^P = 0,9\%$ ,  $O^P = 25\%$ ,  $A^P = 1,8\%$ ,  $W^P = 35 - N\%$ . Расход топлива  $10 + N$  (кг/с). Определить объем воздуха ( $m^3/c$ ), подаваемого в газогенератор с оптимальным коэффициентом недостатка воздуха при температуре  $900^{\circ}C$ .

#### Задача 3.3

Состав топлива в газогенераторе  $C^P = 32 + N\%$ ,  $H^P = 5,1\%$ ,  $S^P = 0,2\%$ ,  $N^P = 0,9\%$ ,  $O^P = 25\%$ ,  $A^P = 1,8\%$ ,  $W^P = 35 - N\%$ . Состав генераторного газа  $CO = 15 + 0,5 \cdot N\%$ ,  $CH_4 = 2,6\%$ ,  $CO_2 = 20 - 0,5 \cdot N\%$ ,  $O^P = 0,4\%$ . Определить содержание в газе азота N, водорода H и теплоту сгорания генераторного газа, если в воздухе объемное содержание азота 79% (плотность азота  $1,25 \text{ кг}/m^3$ ), температура газогенерации  $900 + 5 \cdot N^{\circ}C$ . Коэффициент недостатка воздуха 0,25.

#### Задача 3.4

Состав топлива в газогенераторе  $C^P = 32 + N\%$ ,  $H^P = 5,1\%$ ,  $A^P = 1,8\%$ ,  $S^P = 0,2\%$ ,  $N^P = 0,9\%$ ,  $O^P = 25\%$ ,  $W^P = 35 - N\%$ . Состав генераторного газа  $CO = 15 + 0,5 \cdot N\%$ ,  $CH_4 = 2,6\%$ ,  $CO_2 = 20 - 0,5 \cdot N\%$ ,  $O = 0,4\%$ . Определить содержание в газе азота N, водорода H. Определить тепловой и химический

КПД газогенератора, если температура газогенерации  $900 + 5 \cdot N^\circ\text{C}$ . Температура подаваемого в газогенератор воздуха  $40^\circ\text{C}$ . Коэффициент недостатка воздуха 0,25.

### Задача 3.5

Состав топлива в газогенераторе  $C^p = 32 + N\%$ ,  $H^p = 5,1\%$ ,  $S^p = 0,2\%$ ,  $N^p = 0,9\%$ ,  $O^p = 25\%$ ,  $A^p = 1,8\%$ ,  $W^p = 35 - N\%$ . Состав генераторного газа  $CO = 15 + 0,5 \cdot N\%$ ,  $CH_4 = 2,6\%$ ,  $CO_2 = 20 - 0,5 \cdot N\%$ ,  $O = 0,4\%$ . Определить содержание в газе азота  $N$ , водорода  $H$ . Определить недожог топлива в процентах к низшей теплоте сгорания исходного топлива, если температура газогенерации  $900 + 5 \cdot N^\circ\text{C}$ . Температура подаваемого в газогенератор воздуха  $40^\circ\text{C}$ . Коэффициент недостатка воздуха 0,25. Каким станет недожог топлива, если температуру газогенерации увеличить на  $50^\circ\text{C}$ ?

### Задача 3.6

Состав топлива в газогенераторе  $C^p = 37 + 0,5 \cdot N\%$ ,  $H^p = 5,1\%$ ,  $S^p = 0,2\%$ ,  $N^p = 0,9\%$ ,  $O^p = 25\%$ ,  $A^p = 1,8\%$ ,  $W^p = 30 - 0,5 \cdot N\%$ . Удельный объем камеры газификации  $2 \text{ м}^3/\text{МВт}$ . Напряженность горения  $0,15 \text{ кг}/(\text{м}^2 \text{ с})$ . Выход генераторного газа  $G_{г.г} = 7 - 0,1 \cdot N \text{ кг/с}$ . Коэффициент недостатка воздуха равен оптимальному при температуре газификации  $900^\circ\text{C}$ . Определить расход топлива, диаметр и высоту активной зоны газогенератора.

### Задача 3.7

Состав топлива в газогенераторе  $C^p = 32 + N\%$ ,  $H^p = 5,1\%$ ,  $S^p = 0,2\%$ ,  $N^p = 0,9\%$ ,  $O^p = 25\%$ ,  $A^p = 1,8\%$ ,  $W^p = 35 - N\%$ . Состав генераторного газа  $CO = 15 + 0,5 \cdot N\%$ ,  $CH_4 = 2,6\%$ ,  $CO_2 = 20 - 0,5 \cdot N\%$ ,  $O = 0,4\%$ . Определить содержание в газе азота  $N$ , водорода  $H$  и теплоту сгорания генераторного газа, если в воздухе объемное содержание азота  $79\%$  (плотность азота  $1,25 \text{ кг}/\text{м}^3$ ). Химический КПД газогенератора 0,6. Коэффициент недостатка воздуха 0,3.

### Задача 3.8

Энергетический КПД установки газификации горючего сланца с твердым теплоносителем  $\eta_{\text{ЭН}} = 72\%$ . Установка работает 24 ч в сутки 310 дней в году, потребляет электроэнергию мощностью  $W_э = 1,2 + 0,1 \cdot N \text{ МВт}$ . Установка в день перерабатывает  $1100 + 10 \cdot N \text{ т}$  сланцев с теплотой сгорания  $6 \text{ МДж/кг}$  и вырабатывает в год  $12 + N \text{ тыс. т}$  смолы с теплотой сгорания  $Q_{\text{см}} = 40 \text{ МДж/кг}$ . Определить массовый выход парогазовой смеси (кг/ч) с теплотой сгорания  $Q_{\text{пг}} = 45,8 \text{ МДж/кг}$ , если доля потенциального тепла, остающегося в коксозольном остатке, составляет  $q_{\text{кокс}} = 30\%$ . Определить количество горячей воды  $G_{\text{гор}}$  (т/ч), вырабатываемой установкой для собственных нужд предприятия с температурой  $70 - N^\circ\text{C}$  (технологическая вода поступает в установку с температурой  $18^\circ\text{C}$ ).