

Новицкий П.Л., Остапенко М.А., Савинов М.М., Зборщик М.П.,
Нестеров А.Н. (ДонНТУ)

КОМБИНИРОВАННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ БУРОГО УГЛЯ

Рассмотрена принципиальная схема комбинированной технологии (полукоксование и газификация) комплексной переработки бурого угля. Приведена методика расчета материального и теплового балансов процессов.

В настоящее время большое внимание проявляется к поиску альтернативных направлений решения топливно-энергетических проблем Украины. Внимание направлено, прежде всего, на использование бурых углей, сланцев, низкосортных каменных углей и углеводородсодержащих отходов.

Наиболее перспективной для промышленного внедрения в настоящее время является комбинированная технология полукоксования и газификации бурого угля, которая имеет следующие достоинства [1]:

- энергетическая автономность за счет использования генераторного газа для сушки угля и применения золы генераторов в качестве сыпучего теплоносителя при полукоксовании;
- возможность получения товарного газа с заданной калорийностью путем смешивания генераторного газа и газа полукоксования;
- возможность решения проблемы использования избыточного полукокса путем его частичной газификации;
- более высокие технико-экономические показатели по сравнению с показателями при полукоксовании или при газификации.

Принципиальная схема комбинированной технологии комплексной переработки бурого угля приведена на рисунке 1.

Рядовой бурый уголь, поступающий в бункер 1, подвергается двум стадиям дробления и сушки: первая стадия — в молотковой дробилке 2 и трубном пространстве трубчатой сушилки 3; вторая стадия — в молотковой дробилке 4 и трубе-сушилке 5.

Для сушки угля используется газовый теплоноситель, который образуется при сжигании в топке 6 генераторного газа.

Теплоноситель из топки 6 подается в нижнюю часть дробилки 4, откуда вместе с измельченным углем выносится в трубу-сушилку 5. После очистки от частиц угля в циклоне 7 теплоноситель проходит межтрубное пространство трубчатой сушилки 3 и дымососом 22 после очистки выбрасывается в атмосферу.

При охлаждении теплоносителя в межтрубном пространстве сушилки 3 образуется конденсат, который может быть использован после испарения при производстве активных углей (адсорбентов) из полукокса.

Воздух подается в топку 6 вентилятором 15 после предварительного подогрева в теплообменнике 14 за счет тепла газа полукоксования. Подогретый воздух используется также в газогенераторе.

Из циклона 7 уголь поступает в аппарат бертинирования 8, где нагревается до 250°C за счет тепла генераторного газа, который затем после очистки от пыли в циклоне 11 сжигается в топке 6.

потребителям или частично используется после сжигания в топке 6 для сушки угля.

Поглотители бензина и сероводорода стекают в сборники 19 и 21, откуда направляются на регенерацию, т.е. извлечение бензина и сероводорода.

Твердый остаток (полукокс) из реактора полукоксования 10 поступает на газификацию в газогенератор 13. Частично полукокс может быть использован при производстве адсорбентов.

Для связывания диоксида серы в газогенератор подаются кальцийсодержащие добавки.

Расчет выходов продуктов комплексной технологии полукоксования и газификации проводим для технологического модуля производительностью 500 тыс.т/год рядового бурого угля.

Для расчета принимаем усредненный состав бурого угля шахт и разрезов Александровского месторождения (таблицы 1, 2 и 3).

Таблица 1. Техническая характеристика угля, %

W^f	A^d	S^d	V^{daf}	T^{daf}
58,0	20,0	4,0	61,0	16,0

Таблица 2. Элементный состав угля, %

C^{daf}	H^{daf}	S^{daf}	O^{daf}	N^{daf}
69,0	6,0	5,5	18,8	0,7

Таблица 3. Характеристика рядового бурого угля, %

W^f	A^f	V	S^f	C^f	H^f	O^f	N^f	T^f
58,0	8,4	20,5	1,8	23,2	2,06	6,3	0,24	5,4

Состав сухого газа полукоксования принят по результатам экспериментальных исследований [2] и приведен в таблице 4.

Таблица 4. Состав сухого газа полукоксования, %

CO_2+H_2S	CO	C_mH_n	C_mH_{2n+2}	C_2H_6	H_2	N_2
5,0	5,2	2,2	41,4	6,8	34,3	5,1

Принимаем влажность угля после стадии бертинирования (нагрев до температуры 250°C) равной нулю.

Расчетное время работы принимается равным 20 часов в сутки.

Тогда часовая производительность модуля составит

$$P = 500000 / (360 \cdot 20) = 69,44 \text{ т/ч.}$$

В дальнейших расчетах принимается $P = 70,0$ т/ч.

Количество сухого угля G_y , поступающего в реактор полукоксования составит

$$G_y = 70 \cdot (100 - 58) / (100 - 0) = 29,4 \text{ т/ч,}$$

в том числе: золы — $G_{y3} = 29,4 \cdot 0,2 = 5,88 \text{ т/ч}$; горючей массы — $G_{yг} = 23,52 \text{ т/ч}$.

Принимаем выход горючей массы полукокса $G_{пк}$ равным 0,52 т/т горючей массы угля, т.е.

$$G_{пк} = 23,52 \cdot 0,52 = 12,23 \text{ т/ч.}$$

Выход смолы на горючую массу угля принимаем равным 15%, т.е.

$$G_{\text{см}} = 23,52 \cdot 0,15 = 3,53 \text{ т/ч,}$$

что составляет $(3,53/70) \cdot 100 = 5,04\%$ по отношению к рядовому бурому углю.

Масса неконденсирующихся продуктов коксования (газ) составит

$$G_{\text{газ}} = 23,52 - 12,23 - 3,53 = 7,76 \text{ т/ч.}$$

Полученные данные о часовом выходе продуктов используются при аппаратурном оформлении процесса.

С целью получения исходных данных для технико-экономических расчетов определяется годовой выход продуктов.

Масса сухого угля — $500000 \cdot (100 - 58) / 100 = 210000 \text{ т/год,}$

в том числе:

- зола (20%) — $210000 \cdot 20 / 100 = 42000 \text{ т/год;}$
- горючая масса угля — $210000 - 42000 = 168000 \text{ т/год.}$

Выход горючей массы полукокса (0,52 т/т. горючей массы угля) —

$$168000 \cdot 0,52 = 87360 \text{ т/год.}$$

Выход полукокса (горючая масса полукокса + зола полукокса) —

$$87360 + 42000 = 129360 \text{ т/год,}$$

в том числе:

- полукокс на газификацию (20%) — $129360 \cdot 0,2 = 25872 \text{ т/год;}$
- полукокс потребителям — $129360 \cdot 0,8 = 103488 \text{ т/год,}$

в том числе:

- на производство адсорбентов (30%) — $103488 \cdot 0,3 = 31046 \text{ т/год;}$
- полукокс товарный (70%) — $103488 \cdot 0,7 = 72442 \text{ т/год.}$

Выход смолы (15% на горючую массу угля) — $168000 \cdot 0,15 = 25200 \text{ т/год.}$

Выход сухого газа полукоксования — $168000 - 87360 - 25200 = 55440 \text{ т/год,}$

В том числе:

- на процесс сушки угля (40%) — $55440 \cdot 0,4 = 22160 \text{ т/год;}$
- на процессы производства адсорбентов (14,2%) — $55440 \cdot 0,142 = 7863 \text{ т/год;}$
- газ полукоксовый товарный — $55440 - 22160 - 7863 = 25377 \text{ т/год.}$

Плотность сухого газа полукоксования заданного состава, приведенного в таблице 4, при нормальных условиях (0°C, 760 мм рт.ст.) равна $0,6 \text{ кг/м}^3$. Тогда объем товарного газа составляет

$$25377 \cdot 10^3 / 0,6 = 42295000 \text{ м}^3/\text{год} \text{ (5874 м}^3/\text{ч).}$$

Согласно технологической схеме, приведенной на рисунке 1, предварительная сушка угля производится отработанным теплоносителем после сушилки-дробилки. Бертинирование проводится за счет тепла генераторного газа.

В расчете приняты следующие температуры:

- рядовой уголь — 0°C;
- уголь на выходе из первой ступени сушки — 90°C;
- уголь после бертинирования — 250°C;
- водяной пар на газификацию — 150°C;
- воздуха на газификацию — 160°C;
- полукоксового газа на выходе из реактора полукоксования — 500°C.

Статьи прихода тепла.

Тепло, вносимое углем

$$Q_y = G_y \cdot c_y \cdot t_y = 29,4 \cdot 1,5 \cdot 250 = 11,025 \text{ МДж/ч,}$$

где c_y — теплоемкость угля; t_y — температура угля, поступающего в реактор полукоксования.

Тепло, выделяющееся при газификации полукоккса

$$Q_p = G \cdot q_p,$$

где G — количество горючей массы полукоккса, идущее на газификацию;

q_p — количество тепла, выделяющиеся при газификации 1 т горючей массы полукоккса.

Принимаем, что в газогенераторе с полукоксом взаимодействует воздух и водяные пары в соотношении $H_2O:O_2 = 1:2$. Тогда при газификации 1 кмоль углерода выделяется 5,07 МДж/т углерода.

Тепло, вносимое водяным паром

$$Q_n = 400 \cdot 150 \cdot 1,7 = 102 \text{ МДж/ч.}$$

Тепло, вносимое воздухом

$$Q_b = 3600 \cdot 210 \cdot 1,32 = 775 \text{ МДж/ч}$$

Статьи расхода тепла.

Тепло, уносимое газом полукоксования

$$Q_{пг} = 7,75 \cdot 3,8 \cdot 500 = 14,72 \text{ МДж/т.}$$

Тепло, уносимое смолой

$$Q_{см} = 3,53 \cdot 2,5 \cdot 500 = 4,41 \text{ МДж/ч.}$$

Тепло, уносимое генераторным газом

$$Q_{гг} = 5,04 \cdot 1,9 \cdot 800 = 7,66 \text{ МДж/ч.}$$

Генераторный газ имеет следующий состав, в % (об.): H_2 — 7,5; CO — 37,0; N_2 — 55,5.

Потери тепла в окружающую среду Q_n принимаем равными 10% от приходной части.

Тогда уравнение теплового баланса имеет вид

$$Q_y + G \cdot q_b + G \cdot q_n + G \cdot q_p = Q_{пг} + Q_{гг} + Q_{см} + Q_n \text{ или}$$

$$11,025 + 775 \cdot 6 + 1026 + 5,076 = 1,1 \cdot (4,41 + 14,72 + 7,666 + 12,66 - 7506).$$

Откуда находим $G = 0,37$ т/ч.

Количество золы полукоккса на выходе из реактора полукоксования

$$G_{зв} = 5,9 + (12,22 - 0,37) = 17,75 \text{ т/ч.}$$

Низшая теплота сгорания газа полукоксования

$$Q_H^{пк} = 0,127 \cdot (CO) + 0,108 \cdot (H_2) + 0,358 \cdot (CH_4) + 0,638 \cdot (C_2H_6) + 0,591 \cdot (C_nH_m),$$

где после цифр указывается процентное содержание компонентов в газе полукоксования.

$$Q_H^{пк} = 0,127 \cdot 5,2 + 0,108 \cdot 34,3 + 0,358 \cdot 41,4 + 0,638 \cdot 6,8 + 0,591 \cdot 2,2;$$

$$Q_H^{пк} = 24,8 \text{ МДж/м}^3 \text{ (5917 ккал/м}^3\text{)}.$$

Низшая теплота сгорания генераторного газа

$$Q_H^Г = 0,127 \cdot (\text{CO}) + 0,108 \cdot (\text{H}_2) \text{ или } Q_H^Г = 0,127 \cdot 37,0 + 0,108 \cdot 7,5 = 5,5 \text{ МДж/м}^3.$$

Расчетное количество полукокса, идущего на газификацию, является минимально необходимым для поддержания в реакторе полукоксования, установках для сушки угля и бертинирования требуемого технологического режима. При увеличении этого количества избыток генераторного газа используется для собственных нужд (в процессах производства адсорбентов и переработки смолы) или может быть направлен внешнему потребителю.

В таблице 5 приведены основные показатели комбинированного процесса полукоксования и газификации бурого угля.

Таблица 5. Основные показатели процесса полукоксования и газификации угля

Показатели	Единицы измерения	Значение показателя
Производительность установки по рядовому бурому углю	т/год	500000
Низшая теплота сгорания генераторного газа	МДж/м ³	5,5
	Ккал/м ³	1316
Низшая теплота сгорания сухого газа полукоксования	МДж/м ³	24.8
	Ккал/м ³	5917
Газ полукоксования (товарный)	Т/год	25377
	Млн.м ³ /год	42.295
Полукок (товарный)	Т/год	72442
Выход смолы	Т/год	25200

Выводы:

1. Проведенные расчеты показывают, что процессы комплексной технологии полукоксования и газификации бурого угля протекают в энергоавтономном режиме за счет использования генераторного газа при сушке, бертинировании и полукоксовании угля и использовании тепла золы процесса газификации для нагрева угля до температуры полукоксования.

2. При увеличении количества полукокса, подаваемого на газификацию (по сравнению с расчетным), образуется избыток генераторного газа, который может быть направлен внешнему потребителю.

Промышленная реализация комплексной технологии полукоксования и газификации обеспечивает производство товарной продукции (полукок, газ полукоксования и смола), которая может быть использована в различных отраслях промышленности Украины. В частности, смола полукоксования может быть использована в качестве заменителя мазута на ТЭС, а также направлена на дальнейшую переработку с производством

моторных топлив, масел и пека. Имеются предложения об использовании полукокса при производстве брикетов-заменителей кокса и др.

Литература

1. **Зборщик М.П., Остапенко М.А.** Комплексная переработка бурых углей — назревшая проблема угольной отрасли Украины // Кокс и химия, 2001. — № 5. — С. 7–10.

2. **Бутхарейт Л.В., Унгул В.С., Носик В.Н. и др.** Экспериментальные исследования процессов комплексной переработки бурых углей // Уголь Украины, 1996. — № 9. — С. 8–10.

*Об Новицкий П.Л., Остапенко М.А., Савинов М.М.,
Зборщик М.П., Нестеров А.Н., 2006*

УДК 54-127:551.251.552.57

Бутузова Л.Ф. (ДонНТУ), **Зубкова В.В.** (Институт химии, Университет Яна Кочановского, Польша), **Булыга О.С., Исаева Л.Н., Шевкопляс В.Н.** (ИнФОРУ НАНУ)

ВЛИЯНИЕ СЕРЫ УГЛЕЙ НА ПРОЦЕССЫ ПОЛУКОКСОВАНИЯ И КОКСОВАНИЯ

Изучены термические превращения изометаморфных пар низко- и высокосернистых углей марок Д и Ж с использованием дифференциального термического анализа, классических методов Фишера и Сапожникова, а также специально оборудованной коксовой камеры, позволяющей проводить контроль за ходом процесса коксования путем просвечивания угольной загрузки рентгеновскими лучами. Обнаружены значительные различия в траектории движения нелетучей массы угольной загрузки при коксовании слабовосстановленных и восстановленных углей одной стадии метаморфизма и в микроструктуре полученных из них твердых продуктов термодеструкции. Данные оптической микроскопии хорошо согласуются с данными выхода парогазовых продуктов полукоксования, результатами дифференциального термического анализа и данными определения механической прочности коксов.

Высокое содержание серы — это результат геологической истории угольного пласта и один из наиболее важных критериев качества топлива [1–3]. Сернистые соединения негативно влияют на процессы термической переработки твердых горючих ископаемых (ТГИ), что приводит к технологическим и экологическим проблемам (отравление катализаторов, коррозия оборудования, загрязнение атмосферы) и изменению коксующейся способности углей.

Ранее в работах [4–5] было показано, что процессы пластификации и набухания, протекающие в угольной загрузке при нагревании, приводят к перемещению его нелетучей массы. При коксовании некоторых углей возникают высокие внутренние давления, которые очень важно учитывать, так как они могут приводить к повреждению стенок печей. При нагревании хорошо коксующегося угля, его зерна разбухают и формируют газо-насыщенную вспененную массу, в результате чего пластический слой приобретает сложную структуру, т.к. появляются три составляющие его зоны: разбухшие зерна, газо-насыщенная зона и зона сжатия. Эти зоны изучены с использованием рентгеновского анализа угольной загрузки с введением в нее контрастирующих элементов [6]. Процессы перемещения нелетучей массы могут, в общих чертах, быть охарактеризованы