

И.Д. ДРОЗДНИК, И.В. ШУЛЬГА кандидаты техн. наук
(Украина, Харьков, Украинский государственный научно-исследовательский углехимический институт)

ГАЗИФИКАЦИЯ ОТХОДОВ УГЛЕБОГАЩЕНИЯ

Для Украины, как и других стран, не располагающих собственными значительными источниками жидкого и газообразного углеводородного сырья, важнейшее значение имеют технологии переработки углей в заменители продуктов, получаемых из нефти и природного газа [1]. Среди таких технологий в мире наибольшее развитие получила газификация углей – высокотемпературный процесс взаимодействия топлива с окислителями (воздух, кислород, водяной пар, углекислый газ либо их смеси) с целью получения горючих газов (водорода, метана, оксида углерода).

Технология газификации направлена в основном на получение крупнотоннажных продуктов относительно простой структуры, прежде всего газа для энергетических установок либо химического использования. Сырьем для такого процесса могут быть практически любые твердые топлива. Одним из наиболее перспективных направлений является использование в качестве сырья материалов, не находящихся в настоящее время своего квалифицированного использования, в частности, отходов углеобогащения.

Объектами исследования служили две пробы промпродукта, полученные путем обогащения угля шахты им. А.Ф. Засядько в лабораторных условиях угольного отдела УХИНа в различных интервалах плотности разделения – 1,5-1,8 т/м³ (проба 1) и 1,6-1,8 т/м³ (проба 2), а также проба обезвоженных хвостов флотации УОФ ОАО "Авдеевский КХЗ" (проба 3). Данные технического и элементного анализа проб приведены в табл. 1.

Таблица 1

Технический анализ и элементный состав проб									
Проба	ρ , т/м ³	W^r_b , %	A^d , %	V^d , %	S^d_b , %	H^d , %	C^d , %	N^d , %	O^d_{db} , %
1	1,5-1,8	9,2	48,9	18,0	3,37	2,93	40,55	0,87	3,38
2	1,6-1,8	9,0	51,9	17,6	4,16	2,70	37,74	0,86	2,64
3	-	9,4	80,0	10,3	0,63	1,44	14,05	0,35	4,16

Представленные данные свидетельствуют, что все пробы характеризуются относительно невысокой рабочей влажностью и высокой зольностью. Основным фактором, влияющим на формирование всей совокупности свойств проб промпродукта, является плотность разделения. Так, для пробы 1, полученной при несколько более низкой плотности разделения (начиная с 1,5 т/м³), характерны меньшая (но тем не менее очень высокая) зольность, большее содержание органического материала, более высокий выход летучих веществ и меньшая сернистость. Проба 2, полученная при большей плотности разделения (на-

Загальні питання технології збагачення

чина с 1,6 т/м³), имеет большие зольность и сернистость, но меньшее содержание органической массы и более низкий выход летучих веществ.

Данные о химическом составе минеральной части приведены в табл. 2.

Таблица 2

Химический состав минеральной части (%)									
Проба	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Прочие
1	55,12	11,97	24,54	1,01	2,45	1,52	0,90	1,25	1,24
2	53,39	13,22	24,22	1,39	2,28	1,42	0,98	2,08	1,02
3	58,60	6,25	22,99	1,42	2,30	0,96	0,77	3,34	3,37

Как видно из этих данных, величина плотности разделения оказывает свое влияние и на химический состав минеральной части. Так, в пробе 1, полученной, начиная с меньших значений плотности разделения, несколько более высокое содержание тугоплавких кислотных оксидов кремния и алюминия, а также сульфатной серы и меньшее – более легкоплавких основных оксидов железа, щелочных и щелочноземельных металлов. Это приводит к некоторому снижению температуры плавления золы, что имеет большое технологическое значение при газификации. Расчетные температуры плавления золы, определенные по методике Ю.С. Кафтана [2], составили для пробы № 1 1045 °С, а для пробы № 2 1065 °С.

Для пробы хвостов флотации, полученных из шихты углеподготовительного цеха № 1 ОАО "Авдеевский КХЗ", характерно еще более высокое содержание тугоплавких оксидов кремния и алюминия, что обусловлено общим строем угольной шихты – необходимостью обеспечения приемлемых значений показателей реакционной способности и послереакционной прочности получаемого кокса, на которые заметное влияние оказывает химический состав минеральной части [3]. В связи с этим температура плавления золы оказывается заметно выше. Ее экспериментально определенное значение составило 1400 °С. Для газификации величина температуры плавления имеет большое технологическое значение – при температурах в реакционной зоне газификации ниже температуры плавления необходимо использовать твердое шлакоудаление, а при больших температурах – жидкое.

В таблице 3 представлены данные о гранулометрическом составе исследованных проб.

Таблица 3

Гранулометрический состав (%) промпродукта по классам крупности, мм							
Проба	+10 мм	10-6 мм	6-2 мм	2-1 мм	1-0,5 мм	0,5-0,25 мм	-0,25 мм
1	4,6	8,7	8,7	12,5	12,0	22,0	31,5
2	8,7	9,6	9,7	12,1	10,0	19,8	30,1
3	-	-	-	-	-	5,9	94,1
3*	-	-	64,2	11,3	7,1	8,5	8,9

Примечание. Проба 3* получена путем дробления с помощью вала высушенных коржей отходов флотации.

Загальні питання технології збагачення

Как видно из данных таблицы, проба № 1 по сравнению с пробой № 2 характеризуется несколько меньшей крупностью, что также обусловлено меньшей плотностью разделения. Тем не менее обе представленные пробы характеризуются неравномерным гранулометрическим составом, что делает невозможным применение для их газификации наиболее распространенных технологий. Так, для технологии Лурги (слоевой процесс) необходим уголь с зернами не менее определенного размера, для технологии Винклер (кипящий) – с двусторонними ограничениями по крупности, для технологий газификации в потоке (Копперс-Тотцек и Тексако) – с ограничениями по верхнему пределу крупности зерен [4]. Наиболее приемлемым агрегатом для газификации материала неоднородной крупности являются вращающиеся барабанные печи.

Хвосты флотации – гораздо более мелкий материал, содержащий в исходном виде 87,9 % частичек размером менее 0,08 мм, что позволяет газифицировать их в потоке. После дробления с помощью вала высушенных коржей отходов флотации почти две трети пробы составляли частички крупностью 6-2 мм, а остальное – отдельные меньших размеров.

С учетом гранулометрического состава проб дальнейшие исследования проводили на имеющемся в УХИНе лабораторном стенде для газификации углеродистых материалов [5]. Конструкция основного узла стенда представлена на рис. 1. В барабан 1 из загрузочного устройства со щелевым дозатором 4 подается перерабатываемый материал, образующий засыпь 2. Угол наклона печи барабанного типа может изменяться в пределах 3-5°, скорость вращения 1-5 об/мин. Внутренний полезный диаметр печи 60 мм, общая длина 600 мм, полезная длина 400 мм. Решетка-насадка, размещенная в печи, обеспечивает необходимый контакт засыпи с компонентами дутья, поступающими через подводящие штуцеры. Образующийся генераторный газ отводится с противоположного торца барабана. С этой же стороны в твердом виде отводится в приемник 8 получаемый шлак. Конструкция головок 3 и остальной арматуры, установленной на противоположных торцах барабана, обеспечивает полную взаимозаменяемость узлов и поэтому позволяет исследовать различные варианты организации движения материальных потоков (прямоток, противоток, комбинированный). Газоплотность вращающейся печи обеспечивается с помощью прижимной втулки 5 и подвижного сальника 6. Вращение печи осуществляется от электрического привода через механическую передачу (на схеме не показаны), для центрирования печи предусмотрены опорные ролики 7.

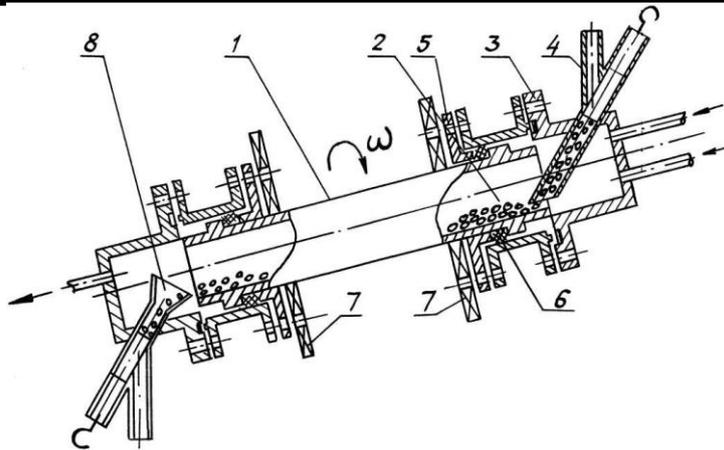


Рис. 1. Вращающаяся барабанная печь

Схема лабораторной установки представлена на рис. 2. Резервуар 7, капельница 8, генератор пара 9 обеспечивают тонкую регулировку подачи пара через обратный клапан 10, а компрессор 11 – подачу воздуха, расход которого измеряется с помощью ротаметра 13. Вывод установки на пусковой режим обеспечивается путем электрического нагрева печи 2 либо путем сжигания смеси природного газа с воздухом, для зажигания которой используют свечу 12. Регулирование температуры в реакционной зоне обеспечивается с помощью комплекса контрольно-измерительных приборов и средств автоматики 16. Выгрузка шлака происходит в бункер 6, а продукты газификации, охлажденные в водяном холодильнике 14, учитываются газовым счетчиком 15 и анализируются.

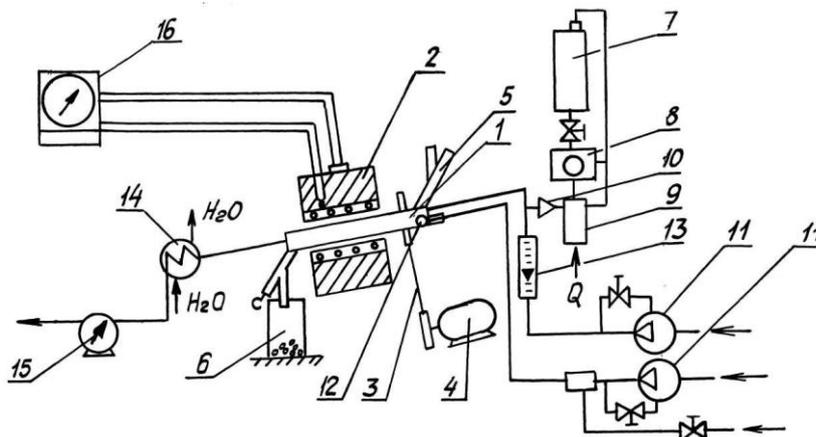


Рис. 2. Схема лабораторной установки

Лабораторный стенд состоит из корпуса 1 печи со съемной решеткой-насадкой, унифицированных съемных головок с механизмом загрузки-выгрузки 5, газоподводящими и пробоотборными штуцерами, пусковыми газовыми горелками и термодарным карманом, опорных головок катушечного типа с латунными опорными втулками и устройства сальникового асбографитового уплотнения прижимного типа, рамы печи, цепного привода вращения 3 с электро-

Загальні питання технології збагачення

двигателем 4, вспомогательной аппаратуры: резервуара, капельницы, генератора пара, воздушного компрессора, регулятора подачи природного газа к горелкам, регулировочных кранов игольчатого типа, электрических печей нагрева с аппаратурой питания, термостатирования, контрольно-измерительных приборов, холодильника генераторного газа, газового счетчика, регулировочной аппаратуры подачи пара и воздуха, приемного устройства для выгрузки и охлаждения твердофазных продуктов.

При проведении экспериментов на лабораторной печи функциями отклика являются следующие экспериментально определяемые величины:

- выход газа, учитываемый газовыми часами;
- компонентный состав газа по данным хроматографического или волюмометрического анализа на приборах ЛХМ-8МД или ВТИ соответственно.

Кроме того, на основании опытных данных рассчитываются следующие показатели:

- влажность газа – по балансу влаги в улавливающей аппаратуре;
- степень разложения водяного пара – по количеству пара в составе дутья и влажности получаемого газа;
- теплотворная способность газа – по его составу.

В ходе выполненных исследований температуру в реакционной зоне, время пребывания в ней материала и массу загружаемого промпродукта выдерживали постоянными и равными соответственно 900 °С; 1,5 ч и 100 г. Расход пара составлял на основании результатов ранее выполненных исследований [6] 55 % от горючей массы материала (0,25, 0,24 и 0,10 г/г для проб 1-3 соответственно), расход кислорода воздуха 90 % от горючей массы материала (1,39, 1,30 и 0,77 литров воздуха на 1 г материала для проб 1-3 соответственно). В таких условиях показатели процесса газификации (выход и состав генераторного газа, степень использования пара, КПД газификации) будут зависеть в первую очередь от свойств перерабатываемого сырья. Выявление именно этих зависимостей и являлось одной из главных задач настоящего исследования.

Показатели газификации промпродукта при использовании паровоздушного дутья приведены в табл. 4.

Анализ представленных данных показывает, что, как и следовало ожидать, результаты газификации в первую очередь зависят от зольности перерабатываемого материала и содержания в нем органической массы. Так, газификация более зольной пробы 2 позволяет получить меньше газа с более низкой теплотворной способностью по сравнению с пробой 1. Это связано как с меньшими ресурсами органического материала в пробе 2, так и с необходимостью нагрева в реакционной зоне большего количества минеральных веществ. Непроизводительные затраты тепла на эти цели требуют сжигания большего количества углерода до CO_2 , в результате меньше углерода газифицируется до CO . Следствием этого является снижение теплотворной способности получаемого газа, уменьшение степени разложения пара (реакции паровой газификации протекают с поглощением тепла) и общего КПД газификации (отношения теплотворной способности полученного генераторного газа к общему приходу тепла).

Загальні питання технології збагачення

Еще более заметно ухудшаются показатели газификации хвостов флотации с зольностью 80% – выход газа снижается более чем вдвое, теплотворная способность и степень разложения пара очень малы, КПД процесса не достигает 40%. Данные выводы подтверждаются сравнением приведенных результатов с показателями газификации относительно малозольного ($\approx 10\%$) твердого продукта термолиза, полученного из концентрата длиннопламенного угля шахты им. Челюскинцев [7]. При этом выход генераторного газа даже по сравнению с газификацией промпродукта был в 2,0-2,5 раза больше, его теплотворная способность достигала 1200 ккал/м^3 , степень конверсии водяного пара при оптимальном режиме газификации превышала 50%, КПД газификации в среднем составлял 75%.

Таблица 4

Показатели газификации промпродукта при использовании паровоздушного дутья

Показатель	Единица измерения	Численное значение		
		Проба 1	Проба 2	Проба 3
Выход газа	л/кг	1933	1785	773
Состав газа:	об. %			
CO ₂		10,8	11,3	19,0
CO		16,2	15,2	8,2
CH ₄		2,3	2,3	2,1
CmHn		0,3	0,3	0,2
H ₂		13,6	13,0	7,9
N ₂		56,8	57,9	62,6
Низшая теплотворная способность	ккал/м ³	1086	1041	653
Содержание примесей:	г/м ³			
H ₂ O		138	142	165
H ₂ S		13,1	17,7	3,9
NH ₃		1,21	1,30	0,88
Смола		8,43	8,96	1,93
Степень разложения пара	%	38,4	36,8	26,2
КПД газификации	%	57,4	54,7	39,4

В связи с этим при переработке особо высокозольного сырья (хвостов флотации) для получения приемлемых технико-экономических показателей процесса целесообразно применять добавку 5...10% более калорийного топлива (например, промпродукта). Это также подтверждает актуальность реализации других путей использования высокозольных отходов, в частности, применение их для производства строительных материалов [8-11].

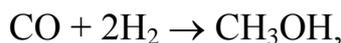
Содержание примесей в генераторном газе обусловлено в первую очередь свойствами газифицируемого материала: промпродукт, полученный при обогащении жирного угля, дает при газификации заметные количества смолы. Высокая сернистость угля шахты им. А.Ф. Засядько привела к значительному содержанию сероводорода в генераторном газе. При промышленной газификации промпродукта необходимо предусмотреть очистку получаемого газа от смолистых веществ и соединений серы.

Кроме того, генераторный газ содержит заметные количества аммиака. По-

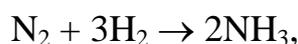
Загальні питання технології збагачення

этому в промышленности будет необходима очистка газа от данного компонента либо применение дорогостоящих коррозионностойких конструкционных материалов.

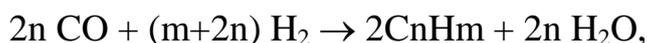
Основными направлениями использования генераторного газа являются энергетическое и химическое. При первом из них компоненты генераторного газа используются как топливо на энергетических установках. Генераторный газ также может использоваться для химических синтезов:
метанола



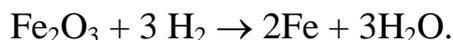
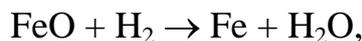
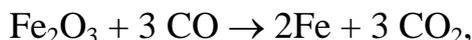
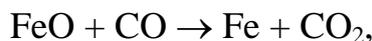
аммиака



углеводородов по Фишеру – Тропшу



прямого восстановления железа в бездоменном процессе



В этом случае для его получения применяют, как правило, парокислородное дутье, за исключением случая использования газа для синтеза аммиака, когда в газогенераторы подают смесь пара с воздухом, обогащенным кислородом. При энергетическом использовании газа тип дутья определяется в первую очередь технико-экономическими показателями и параметрами работы энергетических установок.

Лабораторные исследования выполнялись на паровоздушном дутье. Их результаты позволяют рассчитать ожидаемые свойства генераторного газа и при использовании парокислородного дутья (см. табл. 5).

При парокислородном дутье следует ожидать заметного улучшения показателей газификации: увеличения степени разложения пара, роста КПД процесса, улучшения условий очистки газа от примесей в связи с большими их концентрациями и возрастанием в связи с этим движущих сил физико-химических процессов очистки, уменьшения размеров оборудования. В то же время основное влияние на газификацию будут по-прежнему оказывать свойства сырья,

Загальні питання технології збагачення

прежде всего его высокая зольность, поэтому общие показатели процесса будут все равно ниже аналогичных при переработке менее зольных углеродных материалов. В связи с этим предельный уровень зольности отходов, газифицируемых на парокислородном дутье, не должен превышать 50-55 %. Кроме того, применение парокислородного дутья потребует дополнительных затрат на создание и эксплуатацию кислородной станции.

Таблиця 5

Ожидаемые свойства генераторного газа при использовании парокислородного дутья

Показатель	Единица измерения	Численное значение		
		Проба 1	Проба 2	Проба 3
Выход газа	м ³ /т	847	759	291
Состав газа:	об. %			
CO ₂		24,7	26,6	50,7
CO		37,0	35,8	21,8
CH ₄		5,3	5,4	5,6
CmHn		0,7	0,7	0,5
H ₂		31,9	31,1	21,0
N ₂		0,4	0,4	0,4
Нижшая теплотворная способность	ккал/м ³	2480	2450	1737
Содержание примесей:	г/м ³			
H ₂ S		29,9	41,6	10,4
NH ₃		2,76	3,05	2,34
Смола		19,2	21,1	5,13

Выводы

Исследован процесс газификации отходов обогащения угля: промпродукта ЦОФ "Киевская" и хвостов флотации УОФ ОАО "Авдеевский КХЗ". Показатели процесса газификации определяются в первую очередь зольностью сырья. Ее повышенный уровень приводит к снижению выхода газа, падению степени разложения пара при газификации и ухудшению КПД процесса. Выполнен расчет ожидаемых свойств газа при использовании парокислородного дутья. Представляет также интерес проработка других направлений использования высокозольных отходов обогащения, в частности, применение их для получения строительных материалов.

Список литературы

1. Ковалев Е.Т., Шульга И.В. Анализ перспективных для Украины технологий производства из угля аналогов продуктов переработки нефти и природного газа // УглеХимический журнал. – 2007. – № 1-2. – С. 37-43.
2. О взаимосвязи химического состава и характерных температур плавкости золы углей Донбасса / Ю.С. Кафтан, С.С. Торяник, Л.С. Цебрий и др. // Кокс и химия. – 1996. – № 9. – С. 14-15.
3. Мірошніченко Д.В. Оптимізація реакційної здатності як інтегрального показника якості коксу // Автореф. дис. ... канд. техн. наук 05.17.07. – Харків: УХІН, 2006. – 20 с.
4. Тютюнников Ю.Б., Шептовицкий М.С., Шульга И.В. Газификация углей. – Харьков: Харьк. Инж.-эк. Ин-т, 1994. – 64 с.

Загальні питання технології збагачення

5. Лабораторный стенд для исследования газификации углеродистых материалов / **И.В. Шульга, М.Г. Скляр, А.В. Васильев, и др.** // Кокс и химия. – 1999. – № 2. – С. 19-23.

6. Тютюнников Ю.Б., Шептовицкий М.С., Шульга И.В. Технологические схемы, расчет и моделирование промышленных процессов газификации угля. – Харьков: ХГЭУ, 1996. – 67 с.

7. Шульга И.В., Скляр М.Г., Миненко Е.В. и др. Моделирование процесса газификации твердого продукта термолиза малометаморфизованных углей. Определение оптимальных параметров процесса // Кокс и химия. – 1999. – № 6. – С. 8-12.

8. Использование отходов углеобогащения при обжиге цементного клинкера / **В.И. Бабушкин, В.И. Винниченко, И.В. Шульга и др.** // Кокс и химия. – 1997. – № 8. – С. 32-35.

9. Утилизация отходов при производстве цемента – экологический путь ликвидации терриконов и отвалов / **В.И. Бабушкин, А.И. Здоров, И.В. Шульга, и др.** // Цемент. – 1998. – № 2. – С. 27-28.

10. **Бабушкин В.И., Винниченко В.И., Шульга И.В.** Эффективность использования отходов углеобогащения при обжиге цементного клинкера // Наук. вісник будівництва. – 1998. – Вип. 2. – С. 128-130.

11. **Бабушкин В.И., Винниченко В.И., Шульга И.В.** Повышение эффективности использования отходов углеобогащения при обжиге цементного клинкера // Уголь Украины. – 1998. – № 4. – С. 48-49.

© Дроздник И.Д., Шульга И.В., 2010

Надійшла до редколегії 18.04.2010 р.

Рекомендовано до публікації д.т.н. О.Д. Полуляхом

УДК 622.7

П.И. ПИЛОВ, д-р техн. наук,

Н.М. ВЕРШИННА

(Украина, Днепропетровск, Национальный горный университет)

ВЯЗКОСТЬ РАЗБАВЛЕННЫХ СУСПЕНЗИЙ ПРИ ОБОГАЩЕНИИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Актуальность проблемы состоит в том, что современные обогатительные фабрики, используя в качестве рабочей среды воду, имеют замкнутые системы водооборота. Обратная вода, как правило, представляет собой разбавленные тонкодисперсные суспензии, твердая фаза которых представлена в основном глиной. Ее массовая концентрация, в зависимости от качества систем оборотного водоснабжения, может достигать нескольких десятков килограммов в кубическом метре. Обратная вода, по мере накопления в ней тонкодисперсной твердой фазы, приобретает повышенную вязкость [2], которая негативно влияет на точность сепарационных процессов, что приводит к повышенному взаимозасорению продуктов сепарации и снижению качества концентратов и повышению потерь полезного компонента в отходах. Особую важность эта проблема приобретает для Вольногорского горно-металлургического комбината, перерабатывающего россыпную титаноциркониевую руду, в которой содержится в