

УДК 662.765

РАСЧЕТ ПРОЦЕССА ПРЯМОТОЧНОЙ ГАЗИФИКАЦИИ АНТРАЦИТОВОГО ШТЫБА С ЖИДКИМ ШЛАКОУДАЛЕНИЕМ

© 2022 г. М. Х. Сосна^{1,*}, Ю. А. Соколинский^{1,**}, Д. С. Худяков^{1,***}, А. Л. Лapidус^{1,2}

¹ ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина», 119991 Москва, Россия

² ФГБУН Институт органической химии имени Н.Д. Зелинского РАН (ИОХ РАН), 119991 Москва, Россия

*e-mail: dr.michael.sosna@gmail.com

**e-mail: Jas1933@yandex.ru

***e-mail: khudiakov.d@gubkin.ru

Поступила в редакцию 15.02.2022 г.

После доработки 06.06.2022 г.

Принята к публикации 03.08.2022 г.

Рассмотрена программа расчета процесса газификации, основанная на математической модели прямоточной газификации угля с жидким шлакоудалением, в которой в качестве дутья применяется смесь кислорода и водяного пара. Расчеты были проведены для сырья – антрацитового штыба угольного бассейна «Восточный Донбасс».

Ключевые слова: математическая модель, парокислородная газификация, антрацитовый штыб, жидкое шлакоудаление

DOI: 10.31857/S0023117722060081

Как было показано ранее [1], в настоящее время промышленное использование процесса газификации угля в России отсутствует ввиду экономической нецелесообразности, обусловленной сложностью технологического процесса и экологических проблем, связанных с использованием угля.

В мире производят более 200 млн т аммиака в год [2], из него получают азотные удобрения, различные пластики, взрывчатые вещества и многое другое. На рисунке представлены блок-схемы производства аммиака из различного углеродного сырья.

Из сравнительного анализа различных схем видно, что число технологических стадий при производстве аммиака из угля ~ в 2 раза больше, чем из природного газа, что неминуемо ведет к увеличению капитальных затрат. Все производство продукта в России базируется исключительно на природном газе.

Однако существуют варианты, когда экономическая целесообразность не является основным фактором, определяющим выбор исходного сырья для организации многотоннажного производства химического продукта с высокой добавленной стоимостью, например социальные (см. Конституцию РФ).

В России существуют районы с высоким уровнем безработицы, к числу которых можно отне-

сти российскую часть восточного угольного бассейна «Донбасс», поэтому создание промышленного производства химических продуктов с высокой добавленной стоимостью позволит не только создать новые рабочие места в химической промышленности, но и увеличить угледобычу, значительно сократившуюся после перехода экономики России на рыночные условия.

Добываемые в Донбассе угли относятся к классу антрацитового штыба, в котором отсутствуют или присутствуют в незначительных количествах углеводородные соединения. Этот факт не позволяет использовать ранее разработанную математическую модель и программы расчета процесса прямоточной газификации с жидким шлакоудалением для технико-экономических проработок.

Характеристики углей Донецкого бассейна и топлив на их основе приведены в табл. 1, из которой видно, что содержание летучих в антрацитовом штыбе значительно меньше, чем в газовых углях, поэтому в случае использования балансовой модели процесса газификации, приведенной в [1], расчет усложнится. В связи с этим данная модель расчета была скорректирована в п. 2 замечаний этана на углерод. Также приведены исходные данные (табл. 2–4) и результаты расчета (табл. 5–12) процесса газификации антрацитового штыба (угольный бассейн «Восточный Донбасс»). Отметим, что равновесие химической реакции заклю-

Таблица 1. Характеристики углей Донецкого бассейна* и топлив на их основе [4]

Марка угля	Класс или продукт обогащения	Показатель рабочей массы топлива, %								Максимальное значение зольности ($A^p_{\text{макс}}$), %	Выход летучих на горючую массу (V^p), %	Низшая теплота сгорания (Q^p_n), МДж/кг
		W^p	A^p	S^p_k	S^p_{op}	C^p	H^p	N^p	O^p			
Д	Р	13.0	21.8	1.5	1.5	49.3	3.6	1.0	8.3	31.5	44.0	19.6
Д	Отсев	14.0	25.8	2.5	1.4	44.8	3.4	1.0	7.1	34.0	44.0	17.7
Г	Р	8.0	23.0	2.0	1.2	55.2	3.8	1.0	5.8	31.5	40.0	22.0
Г	Отсев	11.0	26.7	1.9	1.2	49.2	3.4	1.0	5.6	35.0	40.0	19.8
Г	Промпродукт мокрого обогащения	9.0	34.6	3.2	3.2	44.0	3.1	0.8	5.3	45.0	42.0	17.5
Т	Р	5.0	23.8	2.0	0.8	62.7	3.1	0.9	1.7	31.5	15.0	24.2
А	Ш, СШ	8.5	22.9	1.0	0.7	63.8	1.2	0.6	1.3	31.5	3.5	22.6
ПА	Р, отсев	5.0	20.9	1.7	0.7	66.6	2.6	1.0	1.5	31.5	7.5	25.2
Ж, К, ОС	Промпродукт мокрого обогащения	9.0	35.5	1.9	0.6	45.5	2.9	0.9	3.7	45.0	30.0 20.0–34.0	18.0

* В районе Восточного Донбасса в настоящее время добываются преимущественно антрациты (штыбы, рядовой уголь) [4]. Действующие шахты: “Садкинская”, “Обуховская” [5]. АО “Донской антрацит” планирует объединить выработку шахт “Дальняя” и № 410 [6]. В 2022 г. в Ростовской области начнет работать шахта “Садкинская – Восточная”, в настоящее время ведутся проектные работы по строительству шахты “Садкинская – Северная” [7].

Таблица 2. Основные исходные данные

Показатель	Значение
Давление, ати	30.0
Расход водяного пара, нм ³ /ч	60000
Температура пара, °С	350.0
Расход чистого кислорода, нм ³ /ч	100500
Температура технического кислорода, °С	250.0
Состав технического кислорода, об. %:	
O ₂	98.00
N ₂	1.50
Ar	0.50
Температура угля, °С	150.0
Содержание в угле, мас. %:	
зола	23.22
сера	2.12
Остаточный уголь, % (от газифицированного)	0.50
Тепло на сторону, % (от тепла сгорания)	0.19
Степени приближения к равновесию реакций газификации, %:	
C + CO ₂ = 2CO	100.000
C + H ₂ O = CO + H ₂	100.000
CO + 3H ₂ = CH ₄ + H ₂ O	100.000

Таблица 3. Состав и расход технического кислорода

Компонент	об. %	мас. %	нм ³ /ч	кг/ч
N ₂	1.500	1.314	1538.3	1922.9
Ar	0.500	0.625	512.7	914.0
O ₂	98.000	98.061	100500.0	143507.4
Итого	100.000	100.000	102551.0	146344.3

Таблица 4. Состав и расход парокислородной смеси (T* = 290.4°С; P = 30.00 ати)

Компонент	об. %	мас. %	нм ³ /ч	кг/ч
H ₂ O	36.911	24.788	60000.0	48231.1
N ₂	0.946	0.988	1538.3	1922.9
Ar	0.315	0.470	512.7	914.0
O ₂	61.828	73.754	100500.0	143507.3
Итого	100.000	100.000	162551.0	194575.3

* Температура парокислородной смеси 290.4°С обусловлена смешением пара с температурой 350 °С и технического кислорода с температурой 250°С.

Таблица 5. Основные показатели

Показатель	Значение
Температура газификации, °С	1441.0
Расход целевого продукта (СО + Н ₂), нм ³ /ч	314879.2
Эффективность по О ₂ + Н ₂ О, %	98.093
Удельный расход на 1 кг угля, нм ³ /кг	1.6826
Отношение СО:Н ₂	4.6164
Расход угля суммарный, кг/ч в том числе, %:	187 137.5
на сжигание*	38.147
на газификацию	61.545
остаточный уголь	0.308
Расход золы, кг/ч	43 319.6
Содержание золы в выходном газе:	
массовое, кг/кг	0.128
объемное, кг/нм ³	0.135
Тепло на сторону, ГДж/ч	3.347
Тепло сгорания угля, ГДж/ч	1760.154

* В начальный период процесса часть угля подвергают сжиганию в техническом кислороде с целью получения тепла, необходимого для проведения самой газификации антрацитового штыба.

Таблица 6. Состав и расход газа после газификации ($T = 1441.0^{\circ}\text{C}$; $P = 30.00$ ати; $V = 321\,372.8$ нм³/ч; соотношение пар : газ = 0.00191; $V_{\text{сухой газ}} = 320\,759.7$ нм³/ч)

Компонент	об. %	об. % (на сухой газ)	нм ³ /ч	кг/ч
Н ₂ О	0.191	0.000	613.1	492.8
СО	80.533	80.688	258 815.0	323 501.4
Н ₂	17.445	17.478	56 064.2	5 041.0
СО ₂	0.245	0.245	785.9	1 543.5
СН ₄	0.087	0.087	279.2	199.9
Н ₂ С	0.860	0.862	2 764.3	4 203.7
Н ₂	0.479	0.480	1 538.3	1 922.9
Аг	0.160	0.160	512.8	914.0
Итого	100.000	100.000	321 372.8	337 819.2

Таблица 7. Состав газа на выходе из системы охлаждения (квенч-системы*) установки ($T = 220.0^{\circ}\text{C}$; $P = 30.00$ ати; $V = 807\,796.2$ нм³/ч; соотношение пар:газ = 1.518; $V_{\text{сухой газ}} = 320\,759.7$ нм³/ч)

Компонент	об. %	об. % на сух. газ	нм ³ /ч	кг/ч
Н ₂ О	60.292	0.000	487 036.5	391 552.6
СО	32.041	80.688	258 815.0	323 501.4
Н ₂	6.940	17.478	56 064.2	5 041.0
СО ₂	0.097	0.245	785.9	1 543.5
СН ₄	0.035	0.087	279.2	199.9
Н ₂ С	0.342	0.862	2 764.3	4 203.7
Н ₂	0.190	0.480	1 538.3	1 922.9
Аг	0.063	0.160	512.8	914.0
Итого	100.000	100.000	807 796.2	728 879.0

* В квенч-системе охлаждения используется впрыск воды.

Таблица 8. Расчетный расход и состав угля ($T = 150.0^{\circ}\text{C}$; $G_{\text{угля}} = 187\,137.5$ кг/ч)

Компонент	мас. %	кг/ч	моль/ч
Зола	23.220	43 453.3	
Углерод	74.660	139 716.9	11 632.41
Сера	2.120	3 967.3	123.73
Итого	100.000	187 137.5	11 756.14

Таблица 9. Расход и состав остаточного угля ($T = 1441.0^{\circ}\text{C}$; $G_{\text{ост.угля}} = 575.9$ кг/ч)

Компонент	мас. %	кг/ч	к моль/ч
Зола	23.220	133.7	
Углерод	74.660	429.9	35.80
Сера	2.120	12.2	0.38
Итого	100.000	575.8	36.18

Таблица 10. Состав газовой смеси после стадии сжигания угля

Компонент	об. %	мас. %	нм ³ /ч	кг/ч
Н ₂ О	36.911	19.340	60 000.0	48 230.3
СО ₂	61.177	78.310	99 442.2	195 294.7
Н ₂	0.946	0.771	1 538.3	1 922.9
Аг	0.315	0.367	512.8	914.0
SO ₂	0.651	1.212	1 057.7	3 023.7
Итого	100.000	100.000	162 551.0	249 385.6

Таблица 11. Равновесие реакций газификации в процессе парокислородной газификации антрацитового штыба

Реакция	Закон действующих масс Z	Константа равновесия, K_p	$Z/K_p \cdot 100$
$C + CO_2 = 2CO$	7961.6239	7961.4978	100.002
$C + H_2O = CO + H_2$	2210.7923	2210.9732	99.992
$CO + 3H_2 = CH_4 + H_2O$	0.0000004	0.0000004	100.000

Таблица 12. Влияние зольности антрацитового штыба (угольный бассейн “Восточный Донбасс”) на технологические показатели процесса его парокислородной газификации

Показатель процесса на 1000 нм ³ (H ₂ + CO)	Значение зольности ($A_{\text{макс}}^p$), %			
	31.5	28.5	25.5	22.9
Расход угля, кг	671.3	670.2	614.3	589.2
Расход кислорода, нм ³	321.4	320.8	320.2	319.7
Расход пара, кг	141.4	141.1	140.9	140.7

Таблица 13. Закон действующих масс для реакций, протекающих в процессе газификации

Реакция	Формула Z
$C + CO_2 = 2CO$	$\frac{P_{CO}^2}{P_{CO_2}}$
$C + H_2O = CO + H_2$	$\frac{P_{CO}P_{H_2}}{P_{H_2O}}$
$CO + 3H_2 = CH_4 + H_2O$	$\frac{P_{CH_4}P_{H_2O}}{P_{CO}P_{H_2}^3}$

собное влиять на технологические показатели (удельный расход кислорода и органической ча-

сти угля) получения 1000 нм³ смеси H₂ + CO.

Усредненное значение зольности для данного антрацитового штыба оценивается как 22.9% при максимальном ее значении 31.5% [8].

В табл. 12 приведены основные технологические показатели процесса газификации антрацитового штыба в зависимости от его зольности.

Таким образом, скорректированная модель расчета процесса парокислородной газификации антрацитового штыба с жидким шлакоудалением может быть использована для оценки точности решения системы уравнений материального и теплового баланса, химической стехиометрии и уравнений химического равновесия, которые описывают данный процесс.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сосна М.Х., Соколинский Ю.А., Худяков Д.С., Ланидус А.Л.* // ХТТ. 2020. № 5. С. 19. [Solid Fuel Chemistry, 2020, vol. 54, no. 5, P. 269. <https://doi.org/10.3103/S0361521920050092> <https://doi.org/10.31857/S0023117720050096>
2. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/4603818>(дата обращения: 10.01.2022).
3. *Max Appl.* Modern production technologies: ammonia, methanol, hydrogen, carbon monoxide: a review. L.: Nitrogen, 1997. 140 p.
4. *Терентьев Б.Д., Мухин С.Е.* // ГИАБ. 2013. № 12. С. 36.
5. URL: <https://www.nvgazeta.ru/news/12373/567797> (дата обращения: 25.04.2022).
6. URL: <https://expertsouth.ru/news/rekonstruktsiya-shakht-dalnyaya-i-410-v-rostovskoy-oblasti-oboydet-sya-v-15-mlrd-rublej>(дата обращения: 25.04.2022).
7. URL: <https://www.interfax-russia.ru/south-and-north-caucasus/news/donskoy-antracit-obedinil-v-edinuyuset-gornye-vyrabotki-dvuh-shaht-v-rostovskoy-oblasti> (дата обращения: 25.04.2022).
8. Тепловой расчет котельных агрегатов (Нормативный метод). Под ред. Кузнецова Н.В. М.: Энергия, 1973. 296 с.