

Топливо и энергетика

УДК

Разработка новых технологий сжигания твердых топлив в топках с псевдооживленным слоем. 2. Результаты экспериментальных и расчетных исследований

**Майстренко А.Ю.¹, Рохман Б.Б.¹,
Выфатнюк В.Г.², Чернявский Н.В.¹**

¹ Институт угольных энерготехнологий НАН Украины, Киев

² СПКТБ «Энергомашпроект», Киев

С использованием построенной полумэмпирической инженерной методики и экспериментально полученных исходных данных по составу и свойствам коксозольных частиц выполнен расчет вариантов топки КС-котлоагрегата паропроизводительностью 10 т/ч, предназначенной для сжигания высокозольного донецкого угля марки ДГ. Результаты расчетов дают габаритные размеры и распределение тепловосприятости по зонам топки, которые позволяют выбрать оптимальную конструкцию котла.

Ключевые слова: кипящий слой, надслоевое пространство, модель, частица, горение.

З використанням побудованої напівемпіричної інженерної методики та експериментально одержаних вихідних даних щодо складу та властивостей коксозольних частинок виконано розрахунок варіантів топки КШ-котлоагрегата паропроодуктивністю 10 т/год, призначеної для спалювання високозольного донецького вугілля марки ДГ. Результати розрахунків дають габаритні розміри та розподіл теплосприйнятості за зонами топки, які дозволяють вибрати оптимальну конструкцію котла.

Ключові слова: киплячий шар, надшаровий простір, модель, частинка, горіння.

В первой части настоящей работы [1] показано, что промышленная энергетика Украины вынуждена ориентироваться на высокозольные угли и отсева, наиболее эффективной технологией использования которых является сжигание в кипящем слое (КС). Для реализации такого потенциального преимущества технологии КС, как низкий механический недожог в уносе, предложена схема КС-котлоагрегата с развитым надслоевым пространством и с внешней циркулирующей коксозольных частиц. Обоснована неприме-

нимость известного нормативного метода теплового расчета для проектирования энергоустановок с КС. Построена полумэмпирическая инженерная методика расчета параметров рабочего процесса в топке котлоагрегата, которая включает в себя модели КС, переходной зоны (ПЗ) и зоны пневмотранспорта (ЗП), разработаны программы для расчета аэродинамики, тепломассообмена и горения топлива в этих зонах.

Для практического применения данной методики расчета котлоагрегата конкретной про-

Таблица 1. Гранулометрический состав исходного угля

Номер фракции угля i	Верхний размер фракции $\delta_{i\text{угл}} \cdot 10^3, \text{ м}$	Массовая доля фракций угля $Z_{\text{угл}i}$	
		уголь 0–7 мм	уголь 0–13 мм
1	0,05	0,0537	0,0308
2	0,063	0,0153	0,0088
3	0,1	0,0223	0,0128
4	0,16	0,0257	0,0148
5	0,2	0,0208	0,0119
6	0,4	0,1187	0,0681
7	0,63	0,0037	0,0022
8	1,0	0,1046	0,0600
9	1,6	0,0872	0,0501
10	2,5	0,1588	0,0911
11	5,0	0,2091	0,1201
12	7,0	0,1802	0,1035
13	10,0	–	0,1348
14	13,0	–	0,2911

изводительности необходим массив исходных данных, среди которых, кроме известных теплотехнических и физических свойств газов и коксозольных частиц, важнейшими являются такие: марка, химический и гранулометрический состав угля; кинетические характеристики горения углерода коксозольных частиц; гранулометрический состав коксозольных частиц в КС, ПЗ и ЗП.

Ниже в качестве примера приведены исходные данные и обсуждены результаты расчетов различных вариантов топки КС-котлоагрегата с паропро-

Таблица 2. Характеристики материала слоя (экспериментальные результаты)

Номер фракции слоя i	Верхний размер фракции $\delta_{bi}^{*} \cdot 10^3, \text{ м}$	Средняя плотность частиц $\rho_{p,mi}, \text{ кг/м}^3$	Массовая доля фракций слоя Z_{pi}		$k_{0i}, \text{ м/с}$
			уголь 0–7 мм	уголь 0–13 мм	
			1	0,2	
2	0,4	1800	0,0143	0,0171	16900
3	0,63	1790	0,3378	0,3370	26500
4	1,0	1310	0,4190	0,3453	38450
5	1,6	1190	0,1492	0,1399	55150
6	2,5	1190	0,0670	0,0976	80500
7	7,0	1190	0,0127	0,0631	186000

Таблица 3. Исходные данные

Наименование	Обозначение	Вариант						
		I	II	III	IV	V	VI	VII
Крупность топлива, мм		0–7	0–7	0–7	0–13	0–13	0–13	0–13
Коэффициент избытка воздуха на входе в КС и ПЗ	$\alpha_{\text{air},b}$	1,3	1,5	1,9	1,3	1,5	1,9	1,6
	$\alpha_{\text{air},\text{пз}}$	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	2,7

изводительностью 10 т/ч, давлением 16 атм и температурой насыщения 200 °С, в которой сжигается высокозольный донецкий уголь марки ДГ (длиннопламенный газовый). Обозначения соответствуют принятым в [1].

Угля ДГ в Украине добывается 7–8 млн т/год, на обогащение он почти не поступает. Согласно [2], зольность рядового угля ДГ по шахтам колеблется в диапазоне 35–48 %, влажность – в диапазоне 7–10 %. С учетом средних по Донбассу показателей зольности и влажности [2] и элементного состава органической части [3] для расчета принят следующий состав угля на рабочую массу: влажность $W^g = 8,0 \%$, зольность $A^g = 40,44 \%$, углерод фиксированный $C^g_{\text{ф}} = 29,95 \%$, входящие в состав летучих углерод $C^g_{\text{лет}} = 10,16 \%$, сера общая $S^g = 1,82 \%$, водород $H^g = 3,00 \%$, кислород $O^g = 5,99 \%$, азот $N^g = 0,64 \%$. Теплота сгорания летучих веществ данного состава, определенная по формуле Менделеева [3], составляет $Q_{\text{лет}} = 29400 \text{ кДж/кг}$. Для обеспечения заданной паропроизводительности котла при принятом составе угля необходим его расход $V = 1650 \text{ кг/ч}$.

Кроме рядового угля ДГ, для энергетических целей используют его отсев класса 0–13 мм, возможно грохочение с выделением класса 0–7 мм. Для исследований в Институте угольных энерготехнологий (ИУЭ) был отобран образец отсева ДГ класса 0–13 мм со склада Ладыжинской ТЭС с влажностью и зольностью, соответствующим указанным выше. Результаты ситового анализа исходного отсева и выделенного из него класса 0–7 мм приведены в табл.1, верхние размеры фракций соответствуют стандартному размеру сит.

Опытное сжигание угля ДГ классов крупности, указанных в табл.1, было выполнено на установке ИУЭ ЦКС-0,02 производительностью по углю до 20 кг/ч, подробно описанной в [4]. Поскольку основной целью исследования было определение гранулометрического состава слоя при сжигании угля разных классов, известная для связывания серы не подавался. В экспериментах температура КС поддерживалась на уровне 860–930 °С, верхней части топки – 800 °С, средние по сечению топки скорости газа в КС – 1,4–1,6 м/с, в верхней части топки –

Таблица 4. Кипящий слой

Наименование	Обозначение	Варианты расчета						
		I	II	III	IV	V	VI	VII
Плотность воздуха при температуре слоя $\rho_{g,b0}$, кг/м ³	$\rho_{g,b0}$	0,3175	0,3175	0,3175	0,3175	0,3175	0,3175	0,3175
Расход воздуха под решетку, кг/ч	$V_{air,b}$	5587	6446	8166	6332	7306	9254	7793
Расход кислорода на выходе из слоя, кг/ч	$V_{O_2,b,e}$	297	494	890	336	560	1008	672
Количество углерода, сгоревшего в слое, кг/ч	$V_{C,b}$	371	371	371	420	420	420	420
Средняя температура частиц фракции i в слое, °С	$t_{p,bi}$	850	850	850	850	850	850	850
То же		850	850	850	850	850	850	850
То же		850	850	850	850	850	850	850
То же		851	851	850	851	851	850	850
То же		851	851	851	851	851	851	851
То же		851	851	851	851	851	851	851
Тепловоспринимающая поверхность экранов в КС, м ²	$f_{экр,b}$	7,54	6,35	4	9,04	7,68	4,99	6,75
Кондуктивно-конвективный коэффициент теплоотдачи к поверхности экранов, кДж/(с·К·м ²)	$\alpha_{cond,экр}$	0,341	0,341	0,341	0,333	0,333	0,333	0,333
Коэффициент лучистого теплообмена между слоем и поверхностью экранов, кДж/(с·К·м ²)	$\alpha_{rad,экр}$	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Суммарный коэффициент теплоотдачи к поверхности экранов, кДж/(с·К·м ²)	$\alpha_{\Sigma,b}$	0,38	0,38	0,38	0,373	0,373	0,373	0,373
Расход CO ₂ на выходе из КС, кг/ч	$V_{CO_2,b,e}$	1359	1359	1359	1540	1540	1540	1540
Суммарный расход газа на выходе из КС, кг/ч	$V_{g,b,e}$	5958	6817	8536	6752	7726	9674	8213
Коэффициент массообмена между газом и частицей фракции i , м/с	S_i	2,05	2,05	2,065	2,069	2,08	2,089	2,08
То же		1,25	1,25	1,26	1,265	1,271	1,278	1,273
То же		0,86	0,86	0,868	0,873	0,88	0,88	0,88
То же		0,6	0,6	0,6	0,61	0,61	0,61	0,61
То же		0,42	0,42	0,426	0,43	0,43	0,435	0,434
То же		0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,264	0,263
Константа скорости гетерогенной реакции частицы фракции i , м/с	k_{C+O_2i}	0,084	0,084	0,084	0,084	0,084	0,084	0,084
То же		0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
То же		0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
То же		0,275	0,275	0,275	0,275	0,275	0,275	0,275
То же		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
То же		0,937	0,926	0,926	0,938	0,936	0,926	0,935
Скорость газа в КС, м/с	$u_{g,b}$	1,36	1,366	1,373	1,48	1,49	1,494	1,49
Сечение КС, м ²	f_b	3,6	4,1	5,2	3,74	4,3	5,42	4,58
Тепло, необходимое для испарения питательной воды, кДж/ч	Q_{is}	1,9·10 ⁷	1,9·10 ⁷	1,9·10 ⁷	1,9·10 ⁷	1,9·10 ⁷	1,9·10 ⁷	1,9·10 ⁷
Тепло, выделяющееся в КС за счет гетерогенной реакции, кДж/ч	Q_h	1,2·10 ⁷	1,2·10 ⁷	1,2·10 ⁷	1,4·10 ⁷	1,4·10 ⁷	1,4·10 ⁷	1,4·10 ⁷
Тепло, вносимое горячим воздухом в КС, МДж/ч	$Q_{air,b}$	508,8	587,1	743,6	576,6	665,4	842,8	709,7
Тепло, вносимое топливом в КС, кДж/ч	$Q_{угл,b}$	970567	952757	923677	1,1·10 ⁶	1,1·10 ⁶	1,1·10 ⁶	1,0·10 ⁶
Тепло, унесенное газами из КС, кДж/ч	$Q_{g,b,e}$	6,0·10 ⁶	6,8·10 ⁶	8,5·10 ⁶	6,8·10 ⁶	7,7·10 ⁶	9,7·10 ⁶	8,2·10 ⁶
Тепло, унесенное шлаком из КС, кДж/ч	Q_{slag}	418716	418085	417456	474955	474067	473354	473877
Тепло, воспринятое экранами КС, кДж/ч	$Q_{экр,b}$	6,1·10 ⁶	5,2·10 ⁶	3,2·10 ⁶	7,2·10 ⁶	6,1·10 ⁶	4,0·10 ⁶	5,4·10 ⁶
Тепло, вносимое рециркулирующей массой в КС, кДж/ч	Q_{rec0}	884620	1,0·10 ⁶	1,3·10 ⁶	840600	970339	1,2·10 ⁶	1,1·10 ⁶
Кондуктивно-конвективный коэффициент теплоотдачи между слом и частицей фракции i , кДж/(с·К·м ²)	$\alpha_{cond i}$	3,41	3,41	3,41	3,42	3,42	3,42	3,42
То же		1,9	1,9	1,9	1,92	1,92	1,92	1,9
То же		1,19	1,19	1,19	1,2	1,2	1,2	1,2
То же		0,75	0,754	0,754	0,75	0,764	0,765	0,765
То же		0,49	0,495	0,495	0,49	0,5	0,5	0,5
То же		0,29	0,29	0,29	0,292	0,292	0,292	0,292
Коэффициент лучистого теплообмена между слоем и частицей фракции i , кДж/(с·К·м ²)	$\alpha_{rad, i}$	0,375	0,375	0,375	0,375	0,375	0,375	0,375
То же		0,375	0,375	0,375	0,375	0,375	0,375	0,375
То же		0,375	0,375	0,375	0,375	0,375	0,375	0,375
То же		0,375	0,375	0,375	0,375	0,375	0,375	0,375
То же		0,375	0,375	0,375	0,375	0,375	0,375	0,375
То же		0,375	0,375	0,375	0,375	0,375	0,375	0,375
То же		0,376	0,375	0,375	0,376	0,376	0,375	0,376

Таблица 4. (продолжение)

Наименование	Обозначение	Варианты расчета						
		I	II	III	IV	V	VI	VII
Эквивалентный диаметр частиц в слое, м	$\delta_{ek,b}$	$7,3 \cdot 10^{-4}$	$7,3 \cdot 10^{-4}$	$7,3 \cdot 10^{-4}$	$7,8 \cdot 10^{-4}$	$7,8 \cdot 10^{-4}$	$7,8 \cdot 10^{-4}$	$7,8 \cdot 10^{-4}$
Эквивалентная плотность частиц в КС, кг/м ³	$\rho_{p,ek}$	1452	1452	1452	1444	1444	1444	1444
Скорость витания частицы фракции i т, м/с	u_{vi}	1,35	1,358	1,365	1,35	1,358	1,365	1,36
То же		3,34	3,349	3,36	3,34	3,349	3,365	3,35
То же		4,78	4,8	4,82	4,78	4,8	4,8	04.авг
То же		7,45	7,468	7,5	7,45	7,468	7,5	7,48
То же		11,15	11,18	11,22	11,15	11,18	11,2	11,2
То же		18,1	18,2	18,22	18,1	18,2	18,2	18,2
Расход рециркулирующей массы, кг/ч	V_{rec}	2486	2835	3535	2362	2727	3444	3131
Средняя массовая концентрация углерода в слое	C_C	0,006	0,0045	0,003	0,0069	0,005	0,0035	0,0046

3,0–3,3 м/с. Зольность выводимого материала слоя (донной золы) составляла от 99,4 до 99,7 %, наблюдалась тенденция ее увеличения с измельчением класса топлива и увеличением доли первичного воздуха. Средняя плотность частиц донной золы, приведенная в табл.2, оценивалась по насыпной плотности фракций согласно рекомендациям [5].

В стабильных режимах сжигания доля частиц размером менее 0,4 мм в донной золе составляла 10–25 %. Анализ показал, что такая высокая доля мелочи связана только с близостью расположения точек ввода рециркулирующего материала и вывода донной золы в данной

установке и не характеризует материал слоя в целом. При отключении эжектора рециркулирующего материала в моменты вывода донной золы доля мелочи в ней снижалась до менее 2 %, причем большая часть мелочи была представлена фракцией 0,2–0,4 мм. В табл.2 представлен гранулометрический состав выведенной таким образом донной золы, принятый как характерный для материала слоя. Здесь вся мелочь размером менее 0,4 мм отнесена к фракции 0,2–0,4 мм.

В работе [6] экспериментально исследованы кинетические характеристики горения коксового остатка энергетических углей Украины в

Таблица 5. Переходная зона

Наименование	Обозначение	Варианты расчета						
		I	II	III	IV	V	VI	VII
Средняя температура фаз, °С	$t_{пз}$	1094	1076	1048	1122	1100	1066,6	1009
Оставшееся тепло, необходимое для испарения питательной воды, кДж/ч	$Q_{пп,кш}$	$1,3 \cdot 10^7$	$1,4 \cdot 10^7$	$1,6 \cdot 10^7$	$1,2 \cdot 10^7$	$1,3 \cdot 10^7$	$1,5 \cdot 10^7$	$1,4 \cdot 10^7$
Расход воздуха, необходимый для горения летучих, кг/ч	$V_{air,лет}$	3324	3324	3324	3324	3324	3324	3324
Расход углерода на выходе из ПЗ, кг/ч	$V_{C,зп}$	124	124	124	74	74	74	74
Расход воздуха, необходимый для горения углерода, кг/ч	$V_{air,C,пз}$	1433	1433	1433	859,5	859,5	859,5	859,5
Суммарный расход воздуха, вносимый в ПЗ, кг/ч	$V_{air,пз}$	4757	4757	4757	4184	4184	4184	5645
Расход летучих на входе в ПЗ, кг/ч	$V_{лет}$	356,6	356,6	356,6	356,6	356,6	356,6	356,6
Расход газов на выходе из ПЗ с учетом водяного пара, образовавшегося в результате испарения влаги топлива, кг/ч	$V_{г,пз,\Sigma}$	11209	12069	13788	11430	12405	14353	14353
Расход CO ₂ на выходе из ПЗ, кг/ч	$V_{CO_2,пз}$	1978	1978	1978	2159	2159	2159	2159
Расход H ₂ O на выходе из ПЗ, кг/ч	$V_{H_2O,пз}$	574	574	574	574	574	574	574
Расход N ₂ на выходе из ПЗ, кг/ч	$V_{N_2,пз}$	7971	8632	9956	8103	8853	10353	10353
Расход O ₂ на выходе из ПЗ, кг/ч	$V_{O_2,пз}$	626	824	1219	534	758	1206	1206
Расход SO ₂ на выходе из ПЗ, кг/ч	$V_{SO_2,пз}$	61,5	61,5	61,5	61,5	61,5	61,5	61,5
Расход газов на входе в ПЗ, кг/ч	$V_{г,пз0}$	10714	11574	13293	10936	11910	13858	13858
Тепло, вносимое топливом в ПЗ без учета влаги исходного топлива, кДж/ч	$Q_{угл,пз}$	36581	36581	36581	36581	36581	36581	36581
Тепло, вносимое воздухом в ПЗ, кДж/ч	$Q_{air,пз}$	433201	433201	433201	381016	381016	381016	514088
Тепло, выделяющееся при горении летучих в ПЗ, кДж/ч	$Q_{лет}$	$1,05 \cdot 10^7$	$1,05 \cdot 10^7$	$1,05 \cdot 10^7$	$1,05 \cdot 10^7$	$1,05 \cdot 10^7$	$1,05 \cdot 10^7$	$1,05 \cdot 10^7$
Тепло, вносимое рециркулирующей массой в переходную зону, кДж/ч	$Q_{rec,пз}$	$2,1 \cdot 10^6$	$2,4 \cdot 10^6$	$2,9 \cdot 10^6$	$2,0 \cdot 10^6$	$2,3 \cdot 10^6$	$2,9 \cdot 10^6$	$2,6 \cdot 10^6$

КС, а в работе [7] — их зависимость от размера частиц. Согласно данным [6, 7], для коксозольного остатка угля ДГ принята энергия активации $E_a = 114000$ кДж/кмоль. Значения предэкспоненциального множителя k_{0i} для размеров частиц, соответствующих средним по фракциям, приведены в табл.2.

В качестве исходных данных, одинаковых для всех вариантов расчета, приняты:

- высота КС в рабочем состоянии $H_b = 1$ м;
- порозность КС $\varepsilon = 0,72$;
- температура воздуха на входе в топку $t_{air} = 90$ °С;
- температура исходного угля $t_{угл} = 30$ °С;
- температура слоя $t_{g,b} = 850$ °С;
- температура рециркулирующей массы на входе в слой $t_{pec0} = 400$ °С;
- диаметр рециркулирующих частиц $\delta_{C0} = \delta_{ash} = 0,1 \cdot 10^{-3}$ м (δ_{C0} — диаметр коксовой частицы на входе в ЗП, δ_{ash} — размер золы частицы);
- расход питательной воды $V_{wof} = 10000$ кг/ч.

Расчет произведен по семи вариантам (I–VII), которые различаются крупностью исходного топлива, коэффициентами избытка воздуха на входе в КС и ПЗ (по отношению к фиксированному углероду исходного топлива).

Исходные данные, которые варьируются для различных вариантов, приведены в табл.3. Результаты расчетов для КС, ПЗ и ЗП представлены в табл. 4–6 и на рис.1, 2. Анализ результатов позволяет отметить следующее.

В вариантах I–III 75 % фиксированного углерода исходного топлива $C_{rф}$ сгорает в слое, а 25 % — в ЗП; в вариантах IV–VII 85 % $C_{rф}$ сжигается в КС, а 15 % — в зоне пневмотранспорта.

С повышением коэффициента избытка первичного воздуха $\alpha_{air,b}$ от 1,3 (вариант I) до 1,9 (вариант III) происходит уменьшение температур фаз от 1094 до 1048 °С ($t_{g,зп0} = t_{p,зп0} = t_{пз}$; здесь $t_{g,зп0}$, $t_{p,зп0}$ — температуры частиц и газа на входе в ЗП) и возрастание массовой концентрации кислорода от 5,60 до 8,84 % на входе в ЗП. При этом концентрация углерода в рециркулирующей массе снижается от 23,6 до 3,8 % (ср. варианты I и III) и от 16,6 до 2,1 % (ср. варианты IV и VI). Такое резкое падение концентрации углерода обусловлено увеличением степени выгорания коксовых частиц в зоне пневмотранспорта в 3,6 раза.

Для объяснения этого эффекта рассмотрим рис.1, где показано распределение температур дисперсной фазы и газовой смеси вдоль аксиальной оси ЗП высотой $H_{зп} = 7,5$ м. Для малых значений $\alpha_{air,b} = 1,3$ характерно выгорание уг-

Таблица 6. Зона пневмотранспорта

Наименование	Обозначение	Варианты расчета						
		I	II	III	IV	V	VI	VII
Плотность газа на входе, кг/м ³	$\rho_{g,зп0}$	0,28	0,279	0,28	0,273	0,276	0,28	0,293
Скорость газа на входе, м/с	$u_{g,зп0}$	3,3	3,5	3,95	3,4	3,65	4,16	3,97
Плотность газа на выходе, кг/м ³	$\rho_{g,зпe}$	0,356	0,35	0,35	0,36	0,354	0,35	0,35
Скорость газа на выходе, м/с	$u_{g,зп,e}$	2,58	2,8	3,2	2,6	2,86	3,34	3,3
Температура газа на выходе, °С	$t_{g,зп,e}$	799,8	802,4	801,9	798,6	801,4	803,2	798,9
Суммарный расход газа на выходе, кг/ч	$V_{g,зп,e}$	11333	12193	13911	11505	12478	14426	14426
Расход O ₂ на выходе, кг/ч	$V_{O_2,зп,e}$	296,94	492	890	335	561	1009	1009
Расход H ₂ O на выходе, кг/ч	$V_{H_2O,зп,e}$	573,36	573,36	573,36	573,36	573,36	573,36	573,36
Расход N ₂ на выходе, кг/ч	$V_{N_2,зп,e}$	7971	8633	9956	8103	8853	10353	10353
Расход CO ₂ на выходе, кг/ч	$V_{CO_2,зп,e}$	2430	2433	2430	2432	2429,5	2429,9	2430
Лучистый тепловой поток, воспринятый экранами ЗП, МДж/ч	$Q_{экр,зп}$	9811,5	9874,6	10100	8691	8727,1	8938	7459,1
Сечение ЗП, м ²	$f_{зп}$	3,42	3,42	3,42	3,42	3,42	3,42	3,42
Температура стенки экранов ЗП, °С	$t_{экр,зп}$	400	400	400	400	400	400	400
Объемная концентрация рециркулирующих частиц на выходе из ЗП	$\beta_{\Sigma пз,e}$	$4,7 \cdot 10^{-5}$	$4,8 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$4,4 \cdot 10^{-5}$	$4,6 \cdot 10^{-5}$	$4,8 \cdot 10^{-5}$	$4,5 \cdot 10^{-5}$
Скорость золы частиц на выходе, м/с	$u_{ash,зп,e}$	2,4	2,65	3,08	2,472	2,72	3,2	3,19
Температура золы частиц на выходе, °С	$t_{ash,зп,e}$	791,9	794	794	791,3	793,6	795	791
Температура коксовых частиц на выходе, °С	$t_{c,зп,e}$	795	799	801	795	799	804	800
Конвективный коэффициент теплоотдачи от газа к золы частице на выходе, кДж/(с·К·м ²)	$\alpha_{conv,ash}$	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63	1,624	1,62
Концентрация O ₂ на входе, %	—	5,6	6,8	8,84	4,68	6,1	8,4	8,4
Концентрация углерода в рециркулирующей массе на выходе из ЗП, %	—	23,6	14,9	3,8	16,6	9,72	2,1	10
Суммарные потери тепла с механическим недожогом в топке, %	—	6,1	3,73	0,95	2,49	1,46	0,32	1,5

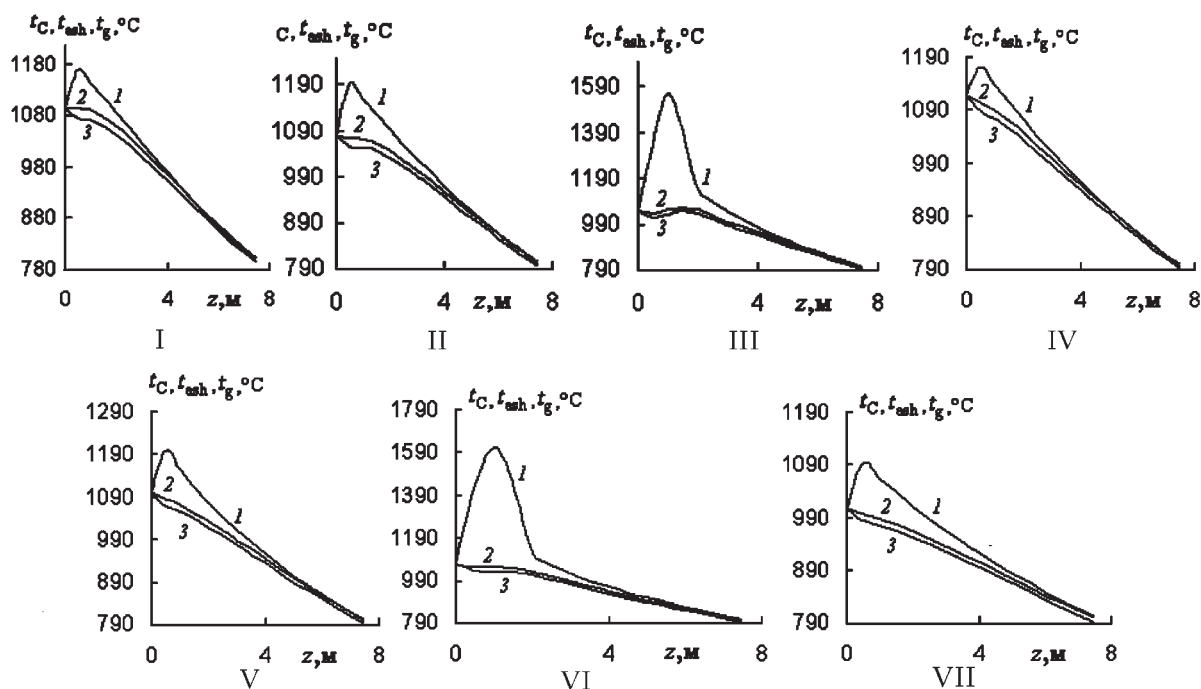


Рис.1. Распределение температур фаз по высоте зоны пневмотранспорта для вариантов I–VII: 1 – t_c ; 2 – t_g ; 3 – t_{ash} .

леродных частиц $\delta_{C0} = 0,1 \cdot 10^{-3}$ м в интервале $0 < z < 2,5$ м при более низких температурах, чем для $\alpha_{air,b} = 1,9$ (ср. варианты I, III и IV, VI, кривые 1), в результате чего константа скорости реакции k_{C+O_2} и, следовательно, степень конверсии углерода в вариантах III, VI оказываются выше, чем в I, IV. Таким образом, при одном и том же количестве израсходованного на горение углерода в ЗП (124 кг/ч для вариантов I, III или 74 кг/ч для вариантов IV, VI), его концентрация в рециркулирующей массе в вариантах III, VI должна быть значительно ниже, чем в I, IV. Повышение температуры коксовых частиц в вариантах не является критичным с точки зрения шлакования, поскольку температура золowych частиц не превосходит температуру начала размягчения золы по всей высоте топки (варианты III и VI, кривые 3).

За область выгорания в ЗП располагается область охлаждения ($2,5 \text{ м} < z < 7,5 \text{ м}$), где происходит уменьшение температур дисперсной фазы и газа по высоте ЗП за счет лучистого теплообмена между газозвесью и настенными экранами топки.

В вариантах VI и VII в топку подается одинаковое количество воздуха (первичного и вторичного), однако соотношение между первичным и вторичным воздухом различно. В VI весь избыточный воздух вводится под перфорированную решетку ($\alpha_{air,b} = 1,9$; $\alpha_{air,пз} = 1,0$), а в VII он распределяется между КС и надслое-

вым пространством в следующем соотношении: $\alpha_{air,b} = 1,6$ и $\alpha_{air,пз} = 2,7$ (см. табл.3). При такой организации процесса горения (вариант VII) температура двухфазного потока на входе в ЗП понижается на 58 °С, что приводит к уменьшению температуры и степени конверсии углерода в области выгорания ($0 < z < 2 \text{ м}$) и, как следствие, к повышению концентрации углерода в рециркулирующей массе до 10 % (см. табл.6, рис.1, варианты VI, VII, кривые 1).

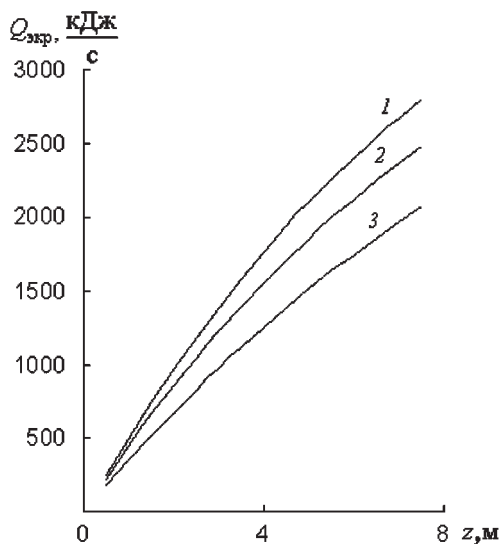


Рис.2. Тепловой поток, воспринятый настенными экранами на участке $0 - z$ зоны пневмотранспорта: 1 – вариант III; 2 – вариант VI; 3 – вариант VII.

На рис.2 показано тепловосприятие настенных экранов в ЗП. В варианте III в зоне пневмотранспорта выгорает фиксированного углерода в 1,68 раза больше, чем в VI, поэтому тепловосприятие испарительных экранов ЗП в варианте III выше, чем в VI (ср. кривые 1 и 2). При различной крупности исходного топлива распределение температур газодисперсных потоков и расходы рециркулирующих коксозольных частиц в ЗП мало отличаются друг от друга, однако концентрация углерода в рециркулирующей массе в варианте III оказывается в 1,8 раза выше, чем в VI (см. табл.6, рис.1, варианты III и VI). При подаче в ПЗ вторичного воздуха с $\alpha_{\text{air,пз}} = 2,7$, необходимого для выгорания 15 % $C_{\text{ф}}$, происходит уменьшение тепловосприятия настенных экранов (рис.2, ср. кривые 2 и 3) за счет понижения температур твердой фазы и газа в ЗП, что следует из уравнений (38), (40), (41) из [1].

По результатам расчетов, а именно: по концентрации углерода в рециркулирующей массе на выходе из топки и потерям тепла с механическим недожогом — наилучшим следует признать вариант VI, а вторым вариант III. В этих вариантах сечение КС близко (5,4 и 5,2 м²), сечение ЗП одинаково (3,42 м²), концентрация углерода в КС близка к полученной при опытном сжигании и не превышает 0,35 %. Однако, при конструировании КС-котлоагрегата по варианту VI могут возникнуть сложности, связанные с залеганием крупных частиц на беспровальной решетке [8], а также с расположением тепловоспринимающих поверхностей котла для компенсации пониженного тепловосприятия испарительных экранов ЗП. Для решения этих вопросов в третьей части работы представлены модель и результаты расчетов динамики выгорания крупных коксовых частиц в КС, определена оптимальная компоновка поверхностей нагрева котла, а также обобщены полученные результаты.

Выводы

1. С использованием построенной полуэмпирической инженерной методики [1] и экспериментально полученных исходных данных по составу и свойствам коксозольных частиц выполнен расчет различных вариантов топки КС-котлоагрегата паропроизводительностью 10 т/ч, предназначенной для сжигания высокозольного донецкого угля марки ДГ. Целью экспериментов было найти конструкцию топки, в которой возможно организовать режим горения с минимальными потерями тепла с механическим недожогом.

2. Численные исследования показывают, что измельчение топлива от 0–13 до 0–7 мм

увеличивает тепловосприятие испарительных экранов ЗП, но одновременно и концентрацию углерода в рециркулирующей массе и общий механический недожог. Подача избыточного воздуха над верхней границей КС не приводит к желаемым результатам из-за значительного понижения температуры газовзвеси на входе в ЗП, вследствие чего происходит повышение концентрации углерода в рециркулирующей массе и снижение тепловосприятия настенных экранов топочной камеры. При прочих равных условиях повышение коэффициента избытка первичного воздуха снижает концентрацию углерода в рециркулирующей массе на выходе топки за счет увеличения скорости горения в надслоевом пространстве; при этом температура золы частиц не достигает начала размягчения золы.

3. Анализ проведенных исследований показывает, что организация оптимального режима горения в топке с КС возможна при следующих условиях: а) в КС сжигается 85 % фиксированного углерода исходного топлива при коэффициенте избытка воздуха $\alpha_{\text{air,b}} = 1,9$; б) вторичный воздух, необходимый для горения летучих веществ и 15 % $C_{\text{ф}}$, подается без избытка, то есть $\alpha_{\text{air,b}} = 1$. При организации такого режима горения угля ДГ крупностью 0–13 мм концентрация углерода в рециркулирующей массе на выходе топки составляет 2,1 %, суммарные потери тепла с механическим недожогом в топке — 0,32 %.

4. Результаты расчетов дают габаритные размеры и распределение тепловосприятия по зонам топки, которые позволяют выбрать оптимальную конструкцию котла.

Список литературы

1. Майстренко А.Ю., Рохман Б.Б., Выфатнюк В.Г., Чернявский Н.В. Разработка новых технологий сжигания твердых топлив в топках с псевдоожженным слоем. 1. Инженерная методика расчета // Энерготехнологии и ресурсосбережение. — 2009. — № 1. — С. 2–12.
2. Довідник показників якості, обсягу видобутку вугілля та випуску продуктів збагачення у 2007 р. — Луганськ : ТК-92 «Вугілля та продукти його перероблення», УкрНДІвуглезбагачення Мінвуглепрому України, 2007. — 60 с.
3. Вдовченко В.С., Мартынова М.И., Новицкий Н.В., Юшина Г.Д. Энергетическое топливо СССР (Ископаемые угли, горючие сланцы, торф, мазут и горючий природный газ) : Справ. — М. : Энергоатомиздат, 1991. — 184 с.
4. Корчевой Ю.П., Майстренко А.Ю., Чернявский Н.В. и др. Сжигание углеродсодержащей золы уноса антрацитовых ТЭС в циркулирующем кипящем слое // Экологические и ресурсосбережение. — 2008. — № 1. — С. 3–12.

5. Баскаков А.П., Лукачевский Б.П., Мухленов И.П. и др. Расчеты аппаратов кипящего слоя : Справ. — Л. : Химия, 1986. — 352 с.
6. Майстренко О.Ю. Основні закономірності горіння та газифікації високозольного вугілля в різних модифікаціях киплячого шару : Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Київ, 1999. — 35 с.
7. Топал О.І. Кінетика та динаміка вигорання високозольного енергетичного вугілля у киплячому шарі під тиском : Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Київ, 2000. — 19 с.
8. Баскаков А.П., Мацнев В.В., Распопов И.В. Котлы и топки с кипящим слоем. — М., 1996. — 362 с.

Поступила в редакцию 06.02.09

The Development of New Solid Fuels Fluidized Bed Combustion Technologies. 2. Results of Experimental and Calculation Research

**Maystrenko A.Yu.¹, Rohman B.B.¹,
Vifatnyuk V.G.², Chernyavskiy N.V.¹**

¹ Coal Energy Technology Institute of NASU, Kiev

² Special Boiler Design Bureau «Energomashproekt», Kiev

Basing on worked out semi-empirical method and experimental results of coke-ash particles composition and properties, calculations are fulfilled of several FB-boiler variants of 10 t/h steam capacity, which is planned to use high-ash bituminous coal. Calculation results give the main combustor sizes and heat-perception distribution per combustion chamber zones, which allow to choose the optimal boiler design.

Key words: fluidized bed, over-bed space, model, particle, burning.

Received February 6, 2009

УДК 662.66

Достоверность определения теплоты сгорания и выхода летучих веществ каменных углей в широком диапазоне зольности

**Филиппенко Ю.Н.¹, Рудавина Е.В.¹,
Скляр П.Т.¹, Чернявский Н.В.²**

¹ ГП «УкрНИИУглеобогащение», Луганск

² Институт угольных энерготехнологий (ИУЭ) НАН Украины, Киев

На основании опробования и лабораторного анализа донецких углей газовой группы установлены зависимости калорийности, выхода летучих и элементного состава от зольности. Доказано, что влияние зольности на калорийность сухой беззольной массы сводится к превращениям при анализе минеральной части угля с уменьшением ее массы, выходом влаги разложения сульфатов и диоксида серы. Предложены методы расчета калорийности с погрешностью значительно меньшей, чем существующие.

Ключевые слова: куголь, теплота сгорания, зольность, минеральная масса, выход летучих веществ.