

## Термодинамические и теплофизические характеристики углей разреза «Северный» Экибастузского региона

### Thermodynamic and thermalphysic characteristics of coals of Ekibastuzsky field' section «Northern»

Касенов Б.К.<sup>1</sup>, Ермаганбет Б.Т.<sup>2</sup>, Рахишева А.Д.<sup>2</sup>, Бекенова Н.Е.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «Международный научно-производственный холдинг «Фитохимия», Караганда;

<sup>2</sup>Казахский университет технологии и бизнеса, Астана

Мақалада Екібастұз бассейнінің «Северный» разрезінің 16 әр түрлі қабаттарынан алынған көмірлердің термодинамикалық және теплофизикалық зерттеулерінің нәтижелері келтірілген. Алғаш рет динамикалық калориметрия әдістерімен 16 қабаттағы көмірлердің жылу сыйымдылықтары мен жылу өткізгіштерінің температураға тәуелділіктері зерттелді, олардың температура өткізгіштіктері есептелді. Тәжірибелік және есептеу әдістерімен олардың жану энтальпиялары анықталды. Алынған нәтижелердің негізінде зерттелген көмірлердің отын өнеркәсібіне пайдалы түрлері ұсынылды.

The article presents the results of coals thermodynamic and thermalphysic researches of the various layers opencast colliery «Severnuy» of Ekibastuzsky region. The temperature dependences of the thermal capacity and thermal conductivity of 16 coals layers have been investigated by the dynamic calorimetry methods for the first time, and temperature conductivity has been calculated. Their enthalpies of combustion have been determined by the experimental the received results. and calculated methods. On the basis of the received results, the recommendations on the most efficient coals for use in the fuel industry have been given.

Исследование теплофизических и термодинамических характеристик углей является основой для определения их теплотворной способности. Изучение указанных показателей углей требует большого труда, проведения экспериментальных исследований на калориметрах различного назначения. Поэтому проведение точных экспериментальных исследований по определению основных тепловых характеристик углей имеет очень важное значение для оценки теплотворной способности углей. В связи с изложенным выше в данной работе приведены результаты экспериментальных и расчетных работ по определению теплофизических характеристик углей 16 пластов разреза «Северный» Экибастузского бассейна с учетом обобщения наших результатов, приведенных в [1].

Следует отметить, что до проведения калориметрических исследований проведен детальный химический и рентгенофазовый анализ изучаемых углей отмеченных выше 16 пластов [2].

Измерение изобарной теплоемкости проводили в интервале 298,15–423 К на серийном калориметре ИТ-С-400. Градуировку прибора проводили определением тепловой проводимости тепломера  $K_T$  в виде стандартного медного образца. Предел допускаемой погрешности прибора  $\pm 10,0\%$ . Время запаздывания образца до нужной температуры регистрировали секундомером. При каждой температуре (шаг 25 К) проводили по пять параллельных опытов, результаты которых усреднялись. Верхний предел температуры (423 К) определен тем, что выше этой температуры начинается изменение веса угля и происходят процессы набухания. Результаты калориметрических измерений приведены в таблице 1.

Методом наименьших квадратов получены уравнения температурной зависимости теплоемкости углей в указанном температурном интервале (табл. 2).

С теплоемкостью связаны также другие важнейшие свойства — теплопроводность и температуропроводность. Под теплопроводностью понимается скорость непосредственной передачи тепла в теле, выраженная в калориях на 1 м/час при разности температуры  $1^\circ$ , и она обозначается индексом  $\lambda$ .

Теплопроводность исследуемых углей определяли на приборе ИТ-Л-400, в котором измерительная ячейка разогревалась с постоянной скоростью до температуры  $400^\circ\text{C}$  ( $673\text{ K}$ ). Градуировка измерителя заключается в экспериментальном определении тепловой проводимости тепломера ( $K_T$ ) и теплового сопротивления ( $P_K$ ), учитывающего контактное сопротивление образца. Тепловая проводимость тепломера определяется по стандартному образцу из плавленого кварца марки ГОСТ 15130-69.

В таблице 3 приведены температурные зависимости теплопроводностей ( $\lambda$ ) углей.

Как указано выше, методом наименьших квадратов выведены уравнения температурной зависимости теплопроводности углей в интервале 298,15–423 К, которые приведены в таблице 4. Далее для вычисления теплопроводности углей определяли их плотности.

Т а б л и ц а 1

## Теплоемкость углей разреза «Северный»

№ пластов	Теплоемкость, Дж/(г·К), при различных температурах, К					
	298,15	323	348	373	398	423
6.8	0,5453	0,7757	1,0672	1,3941	1,5669	2,2434
5.9	0,4966	0,6904	1,1650	1,5848	1,7321	2,7966
8.6	0,590	0,8577	1,2040	1,5871	1,7901	2,6358
2.3	0,9492	1,0168	1,0898	1,1525	1,2284	1,6719
4.4	0,1393	0,3895	1,1571	1,3455	1,4639	1,8216
9.0	0,7454	1,0765	1,4366	1,7926	2,1162	2,6360
1.0	1,1307	1,1370	1,2340	1,4398	1,3077	1,8931
6.0	0,9478	1,1253	1,3224	1,6740	1,6735	2,1897
7.1	0,8840	1,0999	1,3567	1,6244	1,8142	2,3190
2.8	0,8239	1,0029	1,1782	1,3694	1,5341	1,6836
4.0	1,1060	1,2310	1,4930	1,7976	1,8396	2,3427
1.8	0,537	0,8303	1,1817	1,5078	1,8068	2,5370
1.0	0,7724	1,0731	1,4054	1,7318	2,0270	2,5497
5.2	0,3647	0,8101	1,2280	1,4051	1,5042	1,485
1.9	0,6756	0,8802	1,1520	1,4699	1,5950	2,2477
4.6	0,4212	0,8655	1,2633	1,5764	1,7657	1,1755

Т а б л и ц а 2

Уравнения температурной зависимости углей ( $C_p^0$ , Дж/г·К)

№ пластов	Коэффициенты уравнения $C_p^0 = a + bT + cT^2$ , Дж/г·К			$\Delta T$ , К
	$a$	$b$	$c$	
6.8	-8,68	0,02312	207417	298,15–423
5.9	-31,87	0,0722	962000	—
8.6	-10,9	0,030	268833	—
2.3	-0,424	0,00329	18183	—
4.4	-0,28	0,00439	-79593	—
9.0	-5,94	0,01913	87833	—
1.0	-7,34	0,01835	266632	—
6.0	-6,13	0,0175	165667	—
7.1	-5,88	0,01764	134333	—
2.8	-0,88	0,00624	13367	—
4.0	-5,76	0,0170	160417	—
1.8	-9,31	0,02536	203250	—
1.0	-6,04	0,0189	103417	—
5.2	-2,78	0,01313	-68917	—
1.9	-8,30	0,0222	209667	—
4.6	-1,07	0,0096	-121833	—

Т а б л и ц а 3

Теплопроводность ( $\lambda$ ) углей при температурах 298,15–423 К

№ пластов	$\lambda$ , Дж/см·час·К, при различных температурах, К					
	298,15	323	348	373	398	423
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
6.8	1,0730	0,7825	0,5820	0,4815	0,4810	0,4805
5.9	0,7480	0,6127	0,3623	0,4829	0,4887	0,5145
8.6	1,4361	0,9728	0,7096	0,6463	0,5831	0,6198
2.3	0,9133	0,8672	0,7872	0,8049	0,7888	0,7926
4.4	0,4675	0,2114	0,1554	0,0995	0,2435	0,3875
9.0	1,5237	1,0522	0,7807	0,7092	0,6377	0,7662

1	2	3	4	5	6	7
1.0	1,3433	1,0391	0,8348	0,7306	0,7263	0,7220
6.0	1,1418	0,8313	0,6208	0,6103	0,5998	0,5893
7.1	1,6192	1,2169	0,9146	0,8124	0,8102	0,9079
2.8	1,4092	1,2069	1,1047	1,0024	1,0002	0,9979
4.0	0,9618	0,7523	0,5428	0,5332	0,5238	0,6142
1.8	1,8314	1,0641	0,6934	0,5296	0,5624	0,6951
1.0	1,2466	0,8643	0,6821	0,4998	0,5176	0,6353
5.2	2,3459	1,7464	1,3469	1,1475	1,0480	1,0485

Т а б л и ц а 4

Уравнения температурной зависимости теплопроводности углей ( $\lambda$ )

№ пластов	Коэффициенты уравнения $\lambda = a + bT + cT^{-2}$ , Дж/см·час·К			Температурный интервал, К	Коэффициент корреляции, R
	a	b	c·10 <sup>5</sup>		
6.8	-6,587	1,198·10 <sup>-2</sup>	3,632	298,15–423	0,90
5.9	-3,395	6,630·10 <sup>-3</sup>	1,886	–"	0,88
8.6	-9,569	1,747·10 <sup>-2</sup>	5,161	–"	0,91
2.3	-7,049·10 <sup>-2</sup>	1,355·10 <sup>-3</sup>	0,518	–"	0,77
4.4	-9,425	1,776·10 <sup>-2</sup>	4,083	–"	0,83
9.0	-11,476	2,114·10 <sup>-2</sup>	5,958	–"	0,83
1.0	-6,282	1,183·10 <sup>-2</sup>	3,690	–"	0,96
6.0	-8,401	1,558·10 <sup>-2</sup>	4,432	–"	0,94
7.1	-8,522	1,591·10 <sup>-2</sup>	4,479	–"	0,83
2.8	-3,748	7,910·10 <sup>-3</sup>	2,553	–"	0,72
4.0	-6,101	1,162·10 <sup>-2</sup>	3,254	–"	0,86
1.8	-16,303	2,931·10 <sup>-2</sup>	8,342	–"	0,91
1.0	-9,133	1,671·10 <sup>-2</sup>	4,860	–"	0,88
5.2	-11,119	2,002·10 <sup>-2</sup>	6,369	–"	0,86

Как видно из представленных в таблице 4 уравнений, значения теплопроводности большинства исследуемых углей резко снижаются от 298,15 до 423 К. Высокие значения коэффициентов корреляции свидетельствуют о достоверности полученных уравнений.

Плотность углей определяли пикнометрическим методом. Использовали пикнометры емкостью 5 мл. В качестве индифферентной жидкости использовали воду. Ниже, в таблице 5, приведены результаты определения плотности (удельного веса,  $\gamma$ ) углей.

Из данных таблицы 5 видно, что большей плотностью обладает уголь из пласта 2.3, где содержание углерода является наименьшим (16,38 %), а зольность наибольшей (74,05 %). Далее с использованием экспериментальных данных по теплоемкостям и плотностей определили температуропроводность углей.

Т а б л и ц а 5

## Пикнометрические плотности углей

№ пластов	$\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	№ пластов	$\gamma$ , г/см <sup>3</sup>
6.8	1,4906	7.1	1,4695
5.9	1,4744	2.8	1,8651
8.6	1,4922	4.0	1,5580
2.3	1,9534	1.8	1,5643
4.4	1,5369	1.0	1,4602
9.0	1,4564	5.2	1,5017
1.0	1,9191	1.9	1,8019
6.0	1,3950	4.6	1,5940

Известно, что температуропроводность является физической величиной, которая характеризует теплоинерционные свойства. Чем больше эта величина, тем скорее нагревается или охлаждается исследуемый уголь. Величина температуропроводности тел ( $a$ ) определяется как отношение:

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \gamma}, \text{ см}^2/\text{час}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  — теплопроводность, Дж/см·час·К;  $c$  — удельная теплоемкость, Дж/г·К;  $\gamma$  — удельный вес, г/см<sup>3</sup>.

На основании полученных экспериментальных данных по теплоемкостям и плотностям нами по формуле (1) вычислены температуропроводности углей в интервале 298,15–423 К, которые приведены в таблице 6.

Т а б л и ц а 6

## Температурные зависимости температуропроводности углей различных пластов

№ пластов	$a, \text{ см}^2/\text{час}$					
	298,15	323	348	373	398	423
6.8	1,3201	0,6767	0,3876	0,2317	0,2059	0,1437
5.9	0,7480	0,6127	0,3623	0,4829	0,4887	0,5145
8.6	1,6314	0,7602	0,3949	0,2729	0,2183	0,1575
2.3	0,4926	0,4365	0,3697	0,3576	0,3284	0,2425
4.4	2,1845	0,3531	0,0874	0,0489	0,1082	0,1384
9.0	1,3742	0,1348	0,0792	0,0381	0,0790	0,1009
1.0	0,6187	0,4759	0,3776	0,2472	0,2894	0,1986
6.0	0,8636	0,5295	0,3365	0,2613	0,2569	0,1929
7.1	1,2465	0,7528	0,4587	0,3403	0,3040	0,2664
2.8	0,9169	0,6470	0,5027	0,3925	0,3511	0,3180
4.0	0,5581	0,3922	0,2333	0,1852	0,1831	0,3495
1.8	2,1802	0,8193	0,3752	0,2245	0,1990	0,1752
1.0	1,1056	0,5515	0,3324	0,1976	0,1748	0,1707
5.2	4,2795	1,4354	0,7303	0,5435	0,4966	0,4700

Данные таблицы 6 показывают, что с повышением температуры температуропроводность углей падает, что связано, в первую очередь, с тем, что величина, находящаяся в числителе в формуле (1), — теплопроводность, также с повышением температуры падает. Относительно большей температуропроводностью при стандартных условиях (т.е. при 298,15 К) обладают угли из пластов 4.4; 1.8 и 5.2.

Для определения теплоты сгорания углей выбраны отдельные образцы углей с различными содержаниями составляющих их компонентов. Для опытов отобраны угли из пластов 8.6 (содержание углерода 57,48 %), 6.0 (С = 44,63 %) и 4.0 (С = 40,56 %). Теплоту сгорания углей определяли по ГОСТу 147-54. Сущность метода заключается в сжигании навески топлива в калориметрической бомбе в среде сжатого кислорода и в количественном измерении выделившегося при этом тепла. На основании калориметрических измерений установлено, что теплоты сгорания отобранных углей имеют следующие значения: –21225 кДж/кг (8.6), –13623 кДж/кг (6.0) и –9443 кДж/кг (4.0). Полученные результаты показывают, что абсолютные значения теплот сгорания уменьшаются симбатно в связи с понижением содержания углерода в составе угля.

Методом наименьших квадратов получено уравнение, которое показывает зависимость теплоты сгорания углей от процентного содержания углерода в угле:

$$\Delta H_{\text{сгор}}^0 = 17161 - 671,5 (\%, \text{ С}), \text{ кДж/кг}. \quad (2)$$

На основании полученного уравнения вычислены теплоты сгорания углей остальных пластов (табл. 7).

Из данных таблицы 7 видно, что удовлетворительное согласие экспериментальных и расчетных данных по теплотам сгорания углей пластов (8.6), (6.0) и (4.0) показывает достоверность полученного нами уравнения (2) и корректность значений теплот сгорания углей других пластов, вычисленных на основе указанного уравнения.

Данные таблицы 7 показывают, что наиболее большими теплотами сгорания обладают угли пластов (6.8), (5.9), (8.6), (9.0), (7.1) и 1.0 (вторая разновидность).

## Теплоты сгорания углей

№ пластов М.П.	Содержание углерода, %	$-\Delta H^0_{\text{сгор}}$ , кДж/кг		№ пластов М.П.	Содержание углерода, %	$-\Delta H^0_{\text{сгор}}$ , кДж/кг	
		эксперимент	расчет			эксперимент	расчет
6.8	56,94		21074,2	7.1	52,05		17790,6
5.9	52,39		18018,9	4.0	40,56	9443	10075,0
8.6	57,48	21225	21435,5	1.8	37,33		7906,1
4.4	48,16		15715,6	1.0	53,13		18515,8
9.0	54,17		19214,2	5.2	40,56		10075,0
1.0	30,23		3319,8	1.9	27,73		1191,1
6.0	44,63	13623	12807,1	4.6	36,12		7093,6

Таким образом, проведенные исследования показывают, что наиболее благоприятными для сжигания в ТЭЦ являются угли пластов (6.8), (5.9), (8.6), (9.0), (7.1) и (1.0) — вторая разновидность, которые характеризуются большим содержанием углерода, относительно наименьшей зольностью, меньшей теплоемкостью, высокими значениями теплопроводности, температуропроводности и теплотами сгорания. Средними указанными выше показателями обладают угли пластов (4.4), (6.0), (4.0) и (5.2).

## References

1. *Kassenov B.K., Ermaganbet B.T. et al.* Chemical and X-ray phase analysis of coals of various layers of Ekibastuzsky region' section «Northern» // Science and its role in the modern world: Materials of the International scientifically-practical conference. — Karaganda: Bolashak-baspa, 2011. — Vol. 7. — P. 152–154.
2. *Ibid.* — P. 148–152.