

Ильченко К.Д. – д-р. техн. наук, проф., НМетАУ

Ревенко М.Б. – студентка, НМетАУ

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УГЛЕЙ УКРАИНЫ

Приведены теплофизические свойства (энтальпия, теплоемкость и коэффициент теплопроводности) низкосортных углей украинских месторождений.

Введение

В промышленности используются различные естественные и искусственные материалы, которые подвергаются тепловой обработке в технологических процессах. От их теплофизических свойств, в первую очередь, энтальпии, теплоемкости и коэффициента теплопроводности зависит выбор технологических решений, конструкций установок и агрегатов, показатели энергопотребления, режимы эксплуатации.

Основу энергетического потенциала Украины составляет уголь. Достигнутые уровни добычи и потребления угля являются основой многих территориально-производственных комплексов, которые определяют специализацию этих комплексов по энергоемким производствам. В недрах Украины сосредоточено 300 млрд. т угля. По данным экспертов этих запасов должно хватить приблизительно на 250 – 300 лет, что дает возможность рассматривать современную угольную энергетику, как приоритетную, а уголь – как основной энергетический ресурс Украины.

Постановка задачи

Черная металлургия Украины расходует около одной трети общего потребления топлива промышленностью. Однако собственная добыча нефти и газа в Украине покрывает не более 10 % необходимой потребности в топливе. В то же время ископаемые угли Украины представлены всеми марками от бурых углей до антрацитов.

Следует отметить, что добыча качественных спекающихся газовых, жирных углей и антрацита более чем в два раза превышает их долю в запасах, в то время, как добыча углей марок Б, Д, ДГ и Г меньше их доли в балансовых запасах в 1,2 – 7,4 раза, т. е. структура добычи

углей в Украине в настоящее время не соответствует имеющимся запасам. Такое положение отчасти объясняется тем, что низкосортные угли Украины до настоящего времени не находят широкого применения в промышленности, в первую очередь, в черной металлургии.

Одним из способов покрытия потребности металлургии в газообразном топливе является газификация угля. Для производства газа целесообразно использование углей марок Б, Д и ДГ, запасы которых имеются практически во всех регионах Украины. Газификация углей может быть реализована в различных установках, предназначенных для обработки дисперсных частиц, а тепло- и массоперенос в них существенно зависит от теплофизических свойств перерабатываемых углей.

Таким образом, уголь подлежит использованию не только как топливо для энергетических установок, но еще и как технологическое сырье для некоторых технологических процессов, а определение теплофизических свойств угля является одним из основных этапов при планировании промышленных процессов с его использованием.

Состояние угольных запасов Украины

В Украине запасы угля сосредоточены в трех угольных бассейнах: Донецком каменноугольном; Львовско-Волынском; Днепровском бурогоугольном.

Запасы каменного угля в Донецком бассейне составляют 98 % общих запасов, Львовско-Волынском – 2 %, бурый уголь, в основном залегают в Днепровском бассейне.

В Донецком угольном бассейне уголь добывают в 295-и каменноугольных шахтах. Донбасс является самым большим бассейном в Украине, запасы угля составляют примерно 240 млрд. т. Тут есть почти все марки угля: коксующиеся (малая часть запасов), антрацит, газовый уголь. Донецкий уголь характеризуется относительно большой теплотой сгорания, повышенной зольностью (в среднем 25 %) и значительным содержанием серы (среднее содержание – 2,5 %). Себестоимость его сравнительно велика, что обусловлено значительной глубиной залегания пластов. Средняя глубина донецких шахт составляет до 700 м, более 15 % шахт имеют глубину более 1000 м. Около 85 % угля содержится в пластах мощностью 1,2 м и только 15 % имеют большую толщину [1].

Львовско-Волинский бассейн находится на юге Волинской и на севере Львовской областей. В этом бассейне добывают почти 14 млн. т каменного угля. Запасы угля тут невелики, поэтому предполагается, что в перспективе в бассейне будут работать только две шахты из

15-и действующих. Основную часть угольных запасов Львовско-Волынского бассейна составляет газовый уголь (высоколетучий энергетический уголь), другие запасы – переходный уголь от газового к жирному, который характеризуется высоким химическим потенциалом. Зольность угля составляет от 5 до 35 %, содержание серы – 1,5 – 9 %. Значительную часть угля этого бассейна потребляют Бурштынская и Добротворская тепловые электростанции.

Днепровский бурогольный бассейн располагается большей частью на правом берегу Украины и объединяет месторождения Житомирской, Винницкой, Киевской, Кировоградской, Черкасской, Запорожской и Днепропетровской областей. Бассейн разделяют на 12 бурогольных районов, в которых насчитывается более 100 месторождений. Уголь бассейна без прессовки брикетов непригоден для транспортирования на далекие расстояния, характеризуется высокой влажностью (до 60 %) и используется, в основном, на месте. Зольность угля 15 – 45 % и выше, выход летучих веществ составляет 45 – 70 %. Запасы угля, которые можно добывать открытым способом, расположены в 58-и месторождениях. Наибольшее число таких месторождений в Кировоградской (29), Днепропетровской (19) и Черкасской (5) областях. За последние годы его добыча находится в пределах 4,5 млн. т.

Маркировка углей

Уголь оценивают по нескольким параметрам:

- по глубине залегания;
- по марочному составу;
- по качеству;
- по размеру кусков.

Однако четкой границы между углями разных типов нет, принятое деление является условным. Государственным стандартом предусмотрена классификация угля отдельных бассейнов и месторождений по качеству (маркировке). Также уголь разделяют на технологические группы по способности к спеканию.

Маркировка угля производится по следующим характеристикам:

- выходу летучих веществ на горючую массу;
- толщине пластического слоя или коксующей способности.

В основу такого деления на марки и технологические группы положены параметры, которые характеризуют поведение угля в процессе термического влияния на него.

Таблица 1

Маркировка и основные характеристики угля

Марка	Обозначение	Выход летучих веществ V^r , %	содержание углерода C^r , %	Теплота сгорания Q^r_n , МДж/кг
бурый	Б	41 и больше	76 и меньше	28,9 – 31,4
длиннопламенный	Д	39 и больше	76	31,4 – 33,5
газовый	Г	36	83	33,1 – 36,0
жирный	Ж	30	86	34,7 – 36,4
коксующийся	К	20	88	35,2 – 36,4
отощено-спекающийся	ОС	15	89	35,4 – 36,8
тощий	Т	12	90	30,6 – 36,6
антрацит	А	меньше 8	91 и больше	33,4 – 36,5

Кроме указанных в табл. 1 в некоторых бассейнах выделяются промежуточные марки:

- газовые жирные (ГЖ);
- коксующиеся жирные (КЖ);
- коксующиеся вторые (К2);
- слабоспекающиеся (СС).

Для указания технологической группы, к литерному обозначению марки добавляется цифра, которая указывает нижнее значение толщины пластического слоя в данном угле, например Г6, Г17, КЖ14.

Классификация угля по размеру кусков приведена в табл.2.

Таблица 2

Классификация углей по размер кусков

Наименование	Обозначение	Размер кусков, мм
плитняк	П	больше 100
крупный	К	50-100
орех	О	25-50
мелкий	М	13-25
семечко	С	6-13
штыб	Ш	меньше 6
рядовой	Р	не ограниченный

Результаты исследования теплофизических свойств углей и их анализ

Низкокачественные угли Украины характеризуются высокой зольностью, относятся, в основном, к среднесернистым и сернистым и характеризуются высоким выходом летучих веществ. В табл. 3 и 4 представлен технический анализ, элементарный состав горючей массы и свойства золы углей марок Б, Д и Г, а в табл. 5 – 7 – теплофизические свойства исследованных углей, которые определялись на установке ОТСМ-1 по методике, изложенной в [2].

Таблица 3

Технический анализ и элементарный состав углей, %

Уголь, марка	Технический анализ			Элементарный состав			
	зола	летучие	сера	C ^r	H ^r	O ^r	W ^r
бурый, Б	20-23	48-55	4,8-5,0	70,4	4,9	18,0	1,2
длиннопламенный, Д	17-19	42	2,8-3,5	76,0	5,5	11,7	1,6
газовый, Г	12-18	40	1,8-2,4	80,5	5,4	8,2	1,5

Таблица 4

Свойства золы углей

Марка угля	Плавкость золы, °С		
	Момент размягчения, t _н	Момент полусферы, t _в	Момент жидкоплавленного состояния, t _с
Б	1180	1280	1300-1320
Д	1100	1350	1380
Г	1050	1380	1340

Таблица 5

Теплофизические свойства бурого и длиннопламенного углей: *i* – энтальпия [кДж/кг]; *c* – теплоемкость [кДж/(кг·К)]; λ – коэффициент теплопроводности [Вт/(м·К)]

t, °С	Александровский бурый уголь Верболазовского разреза (-61,55)*			Длиннопламенный уголь ОФ “Трудовская” (-47,04)		
	<i>i</i>	<i>c</i>	λ	<i>i</i>	<i>c</i>	λ
100	840	8,397	2,947	662	6,625	2,750
200	1317	6,588	0,793	906	4,532	1,461
300	1173	3,910	0,450	771	2,572	1,062
400	1070	2,676	0,318	525	1,313	0,799
500	835	1,699	0,233	212	0,424	0,291
600	626	1,043	0,167			
700	434	0,620	0,113			
800	250	0,313	0,066			
900	26	0,029	0,007			

* – убыль массы, %

Таблица 6

Теплофизические свойства газовых углей

t, °C	Уголь Добропольской ОФ, Павлоград (-55,44)			Уголь шахты «Пионер», Павлоград (-54,03)			Уголь шахты № 7 Львовско-Волынского бассейна (-51,44)		
	<i>i</i>	<i>c</i>	λ	<i>i</i>	<i>c</i>	λ	<i>i</i>	<i>c</i>	λ
100	571	5,714	4,716	810	8,102	3,264	2175	21,755	3,167
200	1012	5,059	2,314	975	4,873	1,747	2231	11,154	3,165
300	1088	3,628	1,883	908	3,026	1,264	1860	6,199	2,126
400	978	2,444	1,554	706	7,766	0,861	1426	3,566	1,429
500	681	1,362	0,883	469	0,937	0,473	1034	2,069	0,995
600	530	0,884	0,560	250	0,417	0,218	665	1,109	0,613
700	35	0,051	0,034	12	0,017	0,009	373	0,533	0,326
800							173	0,216	0,136

Таблица 7

Теплофизические свойства углей Донецкого бассейна

t, °C	Уголь марки ГД шахты «Центральная» (-63,76)			Уголь марки ГД шахты им. Димитрова (-51,39)			Антрацит (-18,1)		
	<i>i</i>	<i>c</i>	λ	<i>i</i>	<i>c</i>	λ	<i>i</i>	<i>c</i>	λ
100	1445	14,452	4,585	1075	10,748	8,403	149	1,490	3,167
200	1264	5,349	4,350	1384	6,943	6,944	272	1,360	0,411
300	1118	3,727	4,020	1289	4,298	8,374	373	1,240	0,462
400	782	1,954	2,854	1121	2,809	14,898	426	1,060	0,447
500	642	1,284	1,940	837	2,092	9,454	416	0,832	0,371
600	402	0,670	1,151	553	1,106	4,681	386	0,643	0,284
700	145	0,208	0,401	303	0,506	1,880	523	0,747	0,318
800							616	0,770	0,321
900							806	0,895	0,375
1000							1222	1,232	0,516
1100							1495	1,360	0,583

В результате выполненных исследований установлено, что газовые угли шахты «Пионер» и Добропольской обогатительной фабрики по своим теплофизическим свойствам отличаются мало. Близок к ним по свойствам длиннопламенный уголь обогатительной фабрики «Трудовская». Максимальная энтальпия этих углей составляет 900 – 1090 Дж/кг и приходится на температуру 200 °C у длиннопламенного и газового углей шахты «Пионер» и на 300 °C у газового угля Добропольской обогатительной фабрики.

Максимальная энтальпия бурого угля и углей марок ГД составляет 1300 – 1440 кДж/кг, угля марки Г шахты № 7 Львовско-Волынского бассейна – 2231 кДж/кг и приходится на температуру 200 °C (исключе-

чение составляет уголь марки ГД шахты «Центральная», у которого максимальная энтальпия наблюдается при температуре 100 °С).

Степень метаморфизма углей влияет на их теплофизические свойства, в частности, на теплопроводность. По мере перехода от длиннопламенных углей к антрацитам макромолекулы угольного вещества теряют боковые группы и конденсируются. Увеличение плотности углей с ростом степени метаморфизма отражается на их тепловых свойствах. Значение коэффициента теплопроводности увеличивается по мере перехода к газовым углям, с одной стороны, к тощим и антрацитам – с другой. Коэффициент теплопроводности исследованных углей при температуре 400 °С лежит в интервале 0,8 – 1,5 Вт/(м·К).

Сравнение расчетной теплоемкости углей с экспериментальными данными

Теплоемкость углей может быть определена по формуле для теплоемкости твердого топлива [3]:

$$C = \frac{W^P}{100} + \frac{A^P}{100} \cdot C^A + \frac{100 - W^P - A^P}{100} \cdot C^G, \text{ кДж/(кг·К)},$$

где $C^A = 4,187 \left(0,17 + \frac{0,12}{1000} \cdot t_T \right)$, кДж/(кг·К) – теплоемкость золы;

$C^G = 4,187 \left(0,2 + \frac{9(13 + V_G) \cdot (130 + t_T)}{10^6} \right)$, кДж/(кг·К) – теплоемкость горючей

массы топлива; t_T – температура топлива, °С; W^P – влажность топлива, %; A^P – зольность топлива, %; V^G – выход летучих на горючую массу топлива, %.

Результаты расчетов теплоемкости углей приведены в табл. 8.

Таблица 8

Теплоемкость углей различных марок, кДж/(кг·К)

t, °С	Длиннопламенный, Д	Газовый, Г	Бурый, Б
100	1,210	1,202	1,273
200	1,386	1,373	1,482
300	1,566	1,545	1,691
400	1,742	1,724	1,901
500	1,918	1,862	2,110
600	2,093	2,064	2,319
700	2,273	2,236	2,529
800	2,453	2,412	2,738
900	2,629	2,583	2,947

Сравним расчетную теплоемкость углей с экспериментальными данными. Расчетная теплоемкость длиннопламенного угля достаточно

хорошо совпадает с экспериментально измеренной длиннопламенного угля обогатительной фабрики (ОФ) «Трудовская» при температуре топлива 400 °С (1,742 и 1,313 кДж/(кг·К) соответственно). При температурах ниже 400 °С расчетная теплоемкость ниже теплоемкости, измеренной в эксперименте. При температурах выше 400 °С расчетная теплоемкость растет, а экспериментальная уменьшается.

У газового угля расчетная теплоемкость хорошо совпадает с экспериментальной при температуре 400 °С для газового угля шахты «Пионер» (1,721 и 1,766 кДж/(кг·К)) и при температуре 500 °С для газового угля Добропольской ОФ (1,892 и 1,362 кДж/(кг·К) соответственно). При температурах выше 300 °С наблюдаются значительные расхождения между значениями теплоемкости как для газового угля шахты «Пионер», так и для угля Добропольской ОФ.

Для бурого угля складывается почти такая же ситуация, как и для остальных марок, т.е. имеет место совпадение расчетной и экспериментально измеренной теплоемкостей бурого угля Верболозовского разреза при температурах 400 и 500 °С (1,901 и 2,674 кДж/(кг·К); 2,110 и 1,699 кДж/(кг·К)).

Выводы

Газификация низкосортного топлива может частично удовлетворить потребность черной металлургии Украины в газообразном топливе. Результаты исследования теплофизических свойств могут быть использованы при конструировании агрегатов для газификации топлива.

Кроме производства генераторного газа можно наметить другие пути использования низкосортных углей в металлургии

Список литературы

1. Вольчин И.А. Разработка процесса пиролиза низкосортных углей в кипящем слое с целью использования генераторного газа в промышленности: Дис. ... канд. техн. наук: 05.14.04. – К., 1993. – 211 с.

2. Ильченко К.Д., Розенгарт Ю.И., Зайцев Ю.С. и др. Теплофизические свойства материалов металлургического производства: Справочник. – Харьков: Основа, 1995. – 196 с.

3. Лисиенко В.Г., Щелоков Я.М., Ладыгичев М.Г. Топливо. Рациональное сжигание, управление и технологическое использование: Справочное издание: В 3-х книгах. Книга 1 / Под. ред. В.Г. Лисиенко. – М.: Теплотехник, 2004. – 608 с.

Рукопись поступила 01.04.2009 г.