

УДК 662.741

DOI: 10.15372/KhUR2019189

Термоустойчивость бурых углей различных месторождений России и Монголии

Н. И. ФЕДОРОВА¹, Л. М. ХИЦОВА¹, З. Р. ИСМАГИЛОВ^{1,2}¹Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, Кемерово (Россия)

E-mail: FedorovaNI@iccms.sbras.ru

²Институт катализа СО РАН, Новосибирск (Россия)

Аннотация

Проведено термогравиметрическое исследование в инертной и окислительной среде пяти образцов бурых углей различных месторождений России и Монголии. Сравнительный анализ полученных данных показал, что бурый уголь Кангаласского месторождения обладает более высокой термоустойчивостью. Это подтверждается более высоким выходом твердого остатка при пиролизе в инертной атмосфере и низким выходом летучих веществ, а также сдвигом максимума термохимического разложения угольного вещества в область более высоких температур. Определены температурные границы (температура возгорания угля и конечная температура выгорания коксового остатка) термической деструкции в окислительной среде органической массы исследованных образцов. Показано, что бурые угли в сравнении с каменными характеризуются повышенной реакционной способностью по отношению к кислороду. Установлено, что температура возгорания угля возрастает при повышении в исследуемых образцах содержания углерода и снижении выхода летучих веществ, а конечная температура окислительного процесса, при которой происходит выгорание коксового остатка, значимо коррелирует с показателем ароматичности органической массы бурых углей.

Ключевые слова: бурые угли, термогравиметрический анализ, пиролиз, температура возгорания, петрография

ВВЕДЕНИЕ

Бурый уголь представляет собой горючую осадочную породу и является своеобразным звеном при переходе торфа в состояние каменного угля. Россия располагает крупнейшими запасами углей, среди которых на долю бурых углей приходится до 35 %, и занимает второе место в мире по добыче этого вида угля. Следует отметить, что 95 % запасов бурого угольного сырья расположено в азиатской части России. Бурые угли выявлены в Ленском, Канско-Ачинском, Тунгусском, Кузнецком, Тургайском, Таймыльском бассейнах [1, 2]. В зависимости от состава и характеристик бурые угли конкретных месторождений используются в качестве энергетического и техно-

логического сырья [3–5]. Экономическая целесообразность их использования определяется низкой себестоимостью, поскольку они добываются преимущественно открытым, наиболее дешевым способом.

Бурые угли применяются, например, в процессах пиролиза с целью получения полукокса [6, 4] и топливных брикетов [7], углеродных сорбентов [8–10], термического растворения [11, 12], газификации [13], щелочной экстракции для получения гуминовых препаратов [3, 14–16]. Практически во всех технологических процессах бурые угли подвергаются воздействию достаточно высоких температур. Следовательно, для обеспечения рационального и эффективного использования необходимо знать их физико-химические и термические свойства.

В данной работе приведены результаты термogrавиметрического исследования в различных средах бурых углей ряда месторождений России и Монголии.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объектами исследования выбраны угли следующих месторождений, (код образца): Итатское (1), Мунайское (2), Багануурское (Монголия) (3), Архаро-Богучанское (4), Кангаласское (5).

Итатское бурогольное месторождение размещается в западной части Канско-Ачинского бассейна на территории Итатского и Тисульского районов Кемеровской области. Мунайское угольное месторождение расположено в Солтонском районе Алтайского края (в 100 км от г. Бийска). Багануурское месторождение бурого угля находится в центральном аймаке в 110 км на восток от г. Улан-Батор и относится к крупным, наиболее промышленно значимым месторождениям Монголии [1, 3, 17]. Архаро-Богучанское месторождение бурого угля (Нижне-Зейский бассейн) расположено в Архаринском административном районе в 15 км от ст. Архара Амурской области. Кангаласское бурогольное месторождение приурочено к юго-восточному крылу Вилюйской синеклизы и составляет южную часть Якутско-Кангаласского угленосного района Ленского бассейна. Запасы Кангаласского бурогольного месторождения представляют основную часть добываемого в Республике Саха (Якутия) топлива.

Технический анализ углей проводили стандартными методами. Состав органической массы изучали методами элементного анализа. Теплоты сгорания аналитических проб угля (крупностью менее 0.2 мм) определяли согласно ГОСТ 147–95 (ИСО 1928–76) с помощью калориметра C2000 IKA (Германия).

Петрографический анализ выполняли на автоматизированном комплексе оценки марочного состава углей системы SIAMS-620 (Россия) в среде масляной иммерсии по ГОСТ 9414.1–94, ГОСТ Р 55662–2013, ГОСТ Р 55663–2013 и ГОСТ Р 55659–2013. Подсчет микрокомпонентов производился вручную при увеличении в отраженном свете в 300 раз, их количественное соотношение определялось методом подсчета точек. Результаты петрографического исследования приведены на “чистый” уголь, без учета минеральных веществ.

Спектры ЯМР ^{13}C высокого разрешения в твердом теле регистрировали на приборе Bruker

Avance III 300 WB (Германия) с использованием стандартной методики кросс-поляризации с вращением под магическим углом и развязкой от протонов (CPMAS) при частоте 75 МГц. Время контакта 1500 мкс, накопление 4096 сканов, задержка между сканами 2 с, частота вращения образца 5 кГц. Для получения количественных данных проводилось моделирование спектров при помощи программы Dmfit. На спектрах выделялись диапазоны значений химических сдвигов сигналов ЯМР ^{13}C , соответствующие резонансному поглощению следующих групп углеродных атомов, м. д.: 187–171 – атомы углерода карбоксильных групп и их производных ($\text{COO}-$); 171–148 – атомы углерода ароматических систем, связанные с атомом кислорода ($\text{C}_{\text{ар}}\text{O}$); 148–93 – атомы углерода ароматических систем с замещенным и незамещенным атомом водорода ($\text{C}_{\text{ар}} + \text{CH}_{\text{ар}}$); 67–51 – атомы углерода метоксильных групп (OCH_3); 51–0 – атомы углерода алкильных фрагментов ($\text{C}_{\text{алк}}$). По результатам моделирования рассчитывали степень ароматичности (f_a) по соотношению: $f_a = (\text{C}_{\text{ар}} + \text{CH}_{\text{ар}} + \text{C}_{\text{ар}}\text{O})/100$.

Термический анализ проводили на синхронном термоанализаторе Netzsch STA 409 (Германия) в следующих условиях: масса образца 35 мг, тигель платиново-иридиевый, нагрев до 1000 °С со скоростью 10 °С/мин в инертной атмосфере и окислительной среде (смесь азота и воздуха, скорость потока 20 и 40 см³/мин соответственно). В ходе анализа регистрировали потерю массы (кривая термogrавиметрического анализа (ТГ)), скорость потери массы (кривая дифференциального термического анализа (ДТГ)) и тепловой поток (кривая дифференциального термического анализа (ДТА)). Температурный интервал деструкции органической массы образцов в различных средах на кривой ТГ устанавливали методом касательных с помощью программного обеспечения Netzsch Proteus: T_1 – температура начала процесса, T_{max} – температура, при которой достигается максимальная скорость процесса, V_{max} – максимальная скорость в точке перегиба, T_2 – конечная температура. Потерю массы Δm рассчитывали в интервалах наиболее интенсивного разложения образцов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Данные технического анализа и элементного состава исследуемых образцов бурых углей приведены в табл. 1. Видно, что зольность образцов практически не превышает 10 %. Следует отме-

ТАБЛИЦА 1

Характеристика исследованных образцов бурых углей

Код образца	Технический анализ, %				Элементный состав, % на daf			Атомное отношение		Q^{daf} , МДж/кг
	W^a	A^d	V^{daf}	S_t^d	C	H	(O + N + S)	H/C	O/C	
1	7.0	7.5	48.5	0.3	68.7	4.3	27.0	0.75	0.29	25.76
2	8.5	7.2	46.4	0.7	71.5	4.5	24.0	0.76	0.25	27.56
3	11.3	7.4	44.2	0.3	70.9	4.9	24.2	0.83	0.26	27.61
4	4.5	10.8	45.2	0.4	71.0	4.9	24.1	0.83	0.25	27.29
5	2.8	2.8	41.4	0.4	77.5	5.5	17.0	0.85	0.16	31.34

Примечание. W^a – влага аналитическая, A^d – зольность, V^{daf} – выход летучих веществ, S_t^d – общая сера, Q^{daf} – высшая теплота сгорания, daf – сухое беззольное состояние образца.

ТАБЛИЦА 2

Характеристика петрографического состава исследованных образцов бурых углей

Код образца	Петрографический параметр, %					Показатель отражения витринита	
	Vt	Sv	I	L	ΣOK	$R_{o,r}$, %	σ_R
1	54	42	4	1	32	0.388	0.05
2	62	4	31	3	34	0.413	0.05
3	27	8	63	2	68	0.401	0.03
4	41	43	12	4	41	0.403	0.05
5	86	2	6	6	7	0.489	0.03

Примечание. Vt – витринит, Sv – семивитринит, I – инертинит, L – липтинит, ΣOK – сумма отошающих компонентов, $R_{o,r}$ – показатель отражения витринита, σ_R – стандартное отклонение.

тить, что образцы углей Кангаласского и Архаро-Богучанского месторождений первоначально имели зольность 13.5 и 14.6 % соответственно и для корректного проведения термического анализа были подвергнуты обогащению в CCl_4 согласно ГОСТ 1186–2014. Приложение А. Для аналитических исследований использовалась фракция плотностью менее 1.5 г/см³.

Выход летучих веществ (V^{daf}) в исследованных образцах колеблется от 40 до 50 % (см. табл. 1). Наибольшее значение V^{daf} определено для образца угля Итатского месторождения (48.5 %), наименьшее – для кангаласского бурого угля (41.4 %). Исследованные образцы углей являются низкосернистыми, так как содержание серы в них менее 1.0 % (см. табл. 1).

Высшая теплота сгорания Q^{daf} бурых углей достаточно низкая и изменяется от 25.76 МДж/кг для образца 1 до 31.34 МДж/кг для образца 5. Она находится в соответствии с элементным составом и зольностью образцов (см. табл. 1).

Характеристика петрографического состава бурых углей приведена в табл. 2. Согласно представленным данным, показатель отражения витринита ($R_{o,r}$) изменяется от 0.388 (образец 1, Итатское месторождение) до 0.490 % (образец 5,

Кангаласское месторождение). Рефлектограммы всех образцов не имеют разрывов, для них характерен минимальный показатель петрографической неоднородности ($\sigma_R = 0.03$ и 0.05). По результатам исследований бурые угли представляют собой сложную смесь мацералов групп витринита, семивитринита, инертинита и липтинита. Необходимо отметить, что содержание липтинита не столь значительно, его количество в углях колеблется от 1 до 6 мас. % (см. табл. 2). Наибольшее количество мацералов группы витринита (Vt) определено в образце 5 Кангаласского месторождения (86 %) и в образце 2 Мунайского месторождения (62 %). Наибольшее количество инертинита (I) содержит образец 3 Багануурского месторождения Монголии (~63 %).

Выявленную отражательную способность витринита для исследованных бурых углей сопоставили с содержанием углерода (C^{daf}) и кислорода (O^{daf}) в их органической массе (см. табл. 1). Графический анализ показал тесную корреляционную связь показателя отражения витринита $R_{o,r}$ с C^{daf} и O^{daf} (рис. 1). Полученные результаты согласуются с существующим представлением о том, что с увеличением степени метаморфизма углей уменьшаются выход лету-

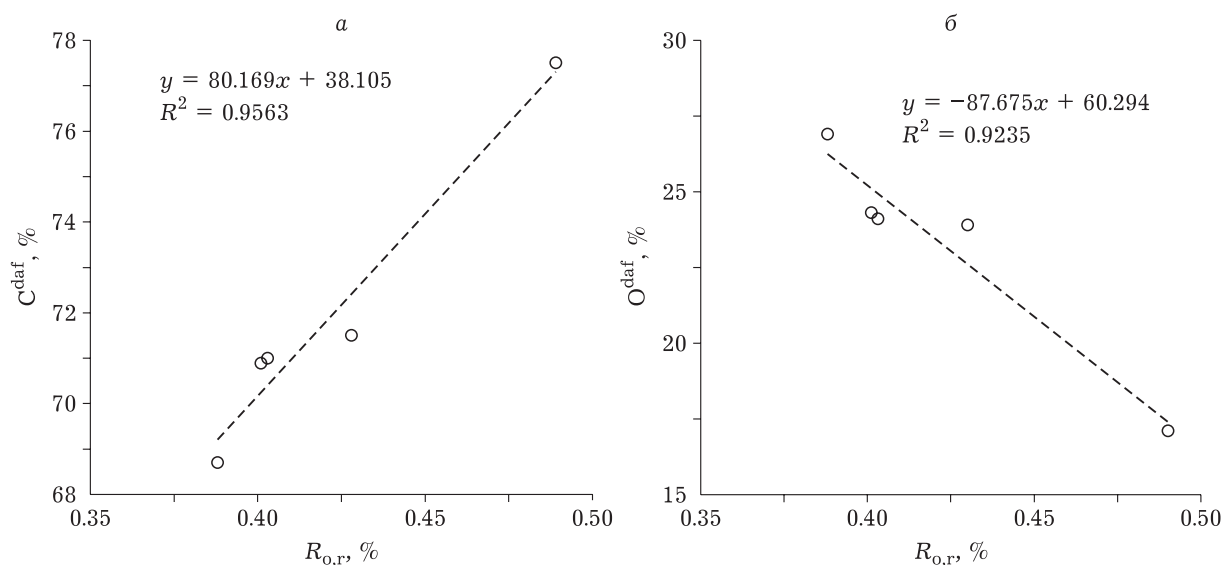


Рис. 1. Взаимосвязь между содержанием углерода C^{daf} (а) и кислорода O^{daf} (б) в органической массе бурых углей и их показателем отражения витринита $R_{o,r}$.

чих веществ, а также величины атомных соотношений Н/С и О/С [18].

Анализ данных спектроскопии ЯМР ^{13}C (табл. 3) выявил, что с увеличением $R_{o,r}$ показатель ароматичности f_a изученных образцов бурых углей возрастает от 0.54 для образца 1 (Итатское месторождение) до 0.64 для образца 5 (Кангаласское месторождение).

Термостойкость органического вещества твердых горючих ископаемых зависит от многих факторов: наличия развитой системы ароматического полисопряжения и способности к ее формированию при нагреве, степени сшивки структуры макромолекул, плотности их упаковки и других факторов [3, 18]. Для выявления особенностей термической деструкции бурых углей на первом этапе работы был проведен термический анализ в инертной атмосфере. Характер ТГ-

кривых для изученных образцов идентичен, и термическое разложение характеризуется несколькими стадиями (рис. 2, а). На начальном этапе нагрева (до 180 °С) отмечается потеря массы образцами углей, связанная с удалением гигроскопической влаги. При более высоких температурах (свыше 340 °С) происходит основная потеря массы, обусловленная деструкцией углерод-углеродных связей с выделением летучих продуктов и формированием твердого карбонизованного остатка.

Результаты обработки ТГ-кривых образцов в инертной среде приведены в табл. 4. Анализ полученных данных показывает, что термическая деструкция исследованных бурых углей протекает примерно в тех же закономерностях, что и термическая деструкция каменных углей. Содержание в них большего количества кислорода

ТАБЛИЦА 3

Параметры фрагментарного состава образцов бурых углей (данным спектров ЯМР ^{13}C)

Код образца	$R_{\text{o,r}}, \%$	Распределение атомов углерода по структурным группам, отн. %							f_{a}
		CH_3	CH_2	CH_3O	$\text{C}_{\text{алк}}\text{O}$	$\text{C}_{\text{ар}}\text{H} + \text{C}_{\text{ар}}$	$\text{C}_{\text{ар}}\text{O}$	COOH	
		Диапазон значений химических сдвигов резонансного поглощения, м. д.							
		0–25	25–51	51–67	67–93	93–148	148–171	171–187	
1	0.388	1.87	26.79	2.45	8.97	49.77	4.71	4.64	0.54
2	0.413	0.45	29.97	2.26	5.82	52.06	4.92	3.81	0.57
3	0.401	0.38	28.89	2.92	5.45	53.21	5.02	3.45	0.58
4	0.403	0.39	28.37	3.15	5.31	53.67	5.54	3.12	0.59
5	0.489	2.11	27.43	2.05	2.57	58.54	5.41	1.67	0.64

Примечание. f_a – степень ароматичности, равная $(\text{C}_{\text{ар}} + \text{CH}_{\text{ар}} + \text{C}_{\text{ар}}\text{O})/100$.

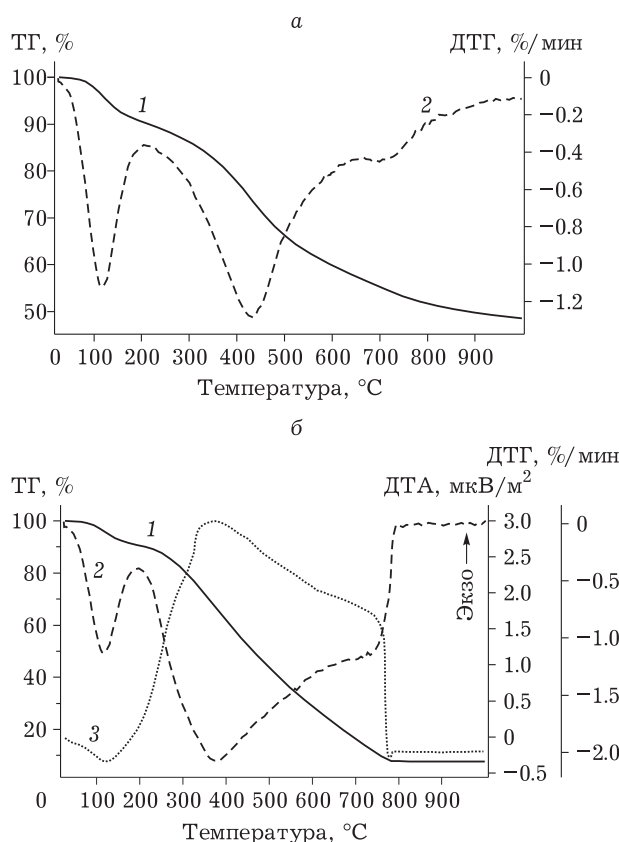


Рис. 2. Кривые термического анализа образца бурого угля Итатского месторождения, проведенного в инертной атмосфере (а) и окислительной среде (б): 1 – ТГ; 2 – ДТГ; 3 – ДТА.

в виде функциональных и эфирных групп, а также в других формах обуславливает меньшую термическую устойчивость этих видов топлива. В низкотемпературной области в интервале 200–340 °С, где в основном протекают реакции дегидратации и декарбоксилирования, наибольшая потеря массы определена для образца 1, который характеризуется наибольшим атомным отношением О/С. Снижение содержа-

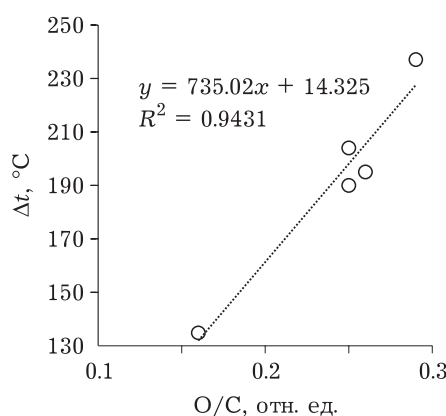


Рис. 3. Взаимосвязь между атомным отношением О/С и температурным интервалом Δt основного разложения органического вещества бурых углей в инертной среде.

ния кислорода в органической массе исследованных образцов (уменьшение атомного отношения О/С) способствует повышению температуры начала термической деструкции T_1 и, как следствие, сужению температурного интервала ($\Delta t = T_2 - T_1$) основного разложения угольного вещества (рис. 3).

Угольное вещество – это высокомолекулярная структурно-организованная система, отдельные компоненты которой проявляют определенные свойства. Структурные единицы слабометаморфизованных бурых углей представлены рыхлыми звеньями фрагментов макромолекул с хаотичным расположением функциональных групп и наличием атомов углерода с различной степенью гибридизации валентных орбиталей. Ароматические, гидроароматические, гетероциклические и нафтенные фрагменты в структурных единицах имеют малые размеры и разделены мостиками различной природы, что находит отражение в большом количественном выходе летучих низкомолекулярных продуктов

ТАБЛИЦА 4

Результаты термогравиметрического анализа образцов бурых углей, проведенного в инертной среде

Код образца	$V_{\max}$, %/min	Температурные границы основного разложения, °С				Δm , мас. %, в температурном интервале, °С			Z
		T_1	$T_{\max}$	T_2	$\Delta t = T_2 - T_1$	200–340	340–600	200–1000	
1	1.28	344	433	581	237	7.1	23.7	51.4	0.30
2	1.40	364	435	568	204	5.5	23.1	48.2	0.24
3	1.44	362	433	557	195	4.8	23.2	46.4	0.21
4	1.55	370	433	560	190	4.0	24.0	41.6	0.17
5	2.10	400	447	535	135	2.5	24.9	38.8	0.10

Примечание. T_1 – температура начала основного разложения; $T_{\max}$ – температура максимального разложения; T_2 – конечная температура основного разложения; Δt – температурная область основного разложения; $V_{\max}$ – максимальная скорость потери массы в интервале температур основного разложения; Δm – потеря массы в соответствующем температурном интервале; $Z = \Delta m(200-340)/\Delta m(340-600)$.

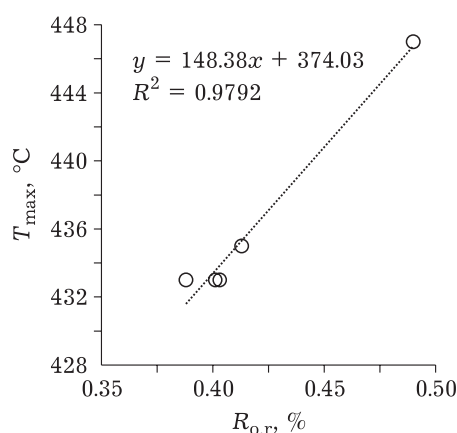


Рис. 4. Зависимость между температурой максимума ($T_{\max}$) потери массы на кривой ДТГ и показателем отражения витринита $R_{o,r}$ бурых углей.

при пиролизе [19]. Параметр Z , представляющий собой отношение потери массы в температурном интервале 200–340 °С к потере массы в температурном интервале 340–600 °С, позволяет оценить соотношение между термически лабильной, преимущественно периферической частью макромолекул бурых углей и их термоустойчивой скелетной частью [20]. Чем меньше Z , тем выше количество термоустойчивых ароматических конденсированных фрагментов в их органической массе. Наименьшее значение параметра Z (см. табл. 4) определено для образца 5 Кангаласского месторождения. Следовательно, он обладает более высокой термоустойчивостью, что отражается в меньшем выходе летучих соединений и, соответственно, более высоком выходе твердого остатка (~61.2 %, см. табл. 4). При этом данный образец обладает самым высоким показателем степени ароматич-

ности ($f_a = 0.64$) его органической массы относительно других исследованных образцов бурых углей (см. табл. 3).

Количественной мерой термостойкости органического вещества углей может служить температура максимума $T_{\max}$ на кривой ДТГ [18, 21]. Из данных рис. 4 видно, что по мере повышения зрелости бурых углей (увеличение показателя отражения витринита $R_{o,r}$) величина $T_{\max}$ угольного материала сдвигается в область более высоких температур.

При определении свойств углей важной характеристикой является показатель их реакционной способности по отношению к кислороду. На рис. 2, б показаны характерные кривые термического анализа бурых углей, проведенного в окислительной атмосфере. До температур ~180 °С фиксируется потеря массы, связанная с выделением гигроскопической влаги. После 240 °С происходит основная потеря массы образцами бурых углей. Кривые ДТГ в области интенсивного окисления имеют характерную форму, повторяемую от образца к образцу. Начало окисления характеризуется увеличением скорости потери массы, которая стабилизируется при последующем увеличении температуры и незначительно изменяется до полного сгорания органического вещества угольного материала. Интенсивная убыль массы во всех экспериментах сопровождается значительным выделением тепла, что отражается наличием интенсивного экзотермического пика на кривой ДТА.

Результаты обработки кривых ТГА образцов в окислительной среде приведены в табл. 5. Анализ полученных данных показывает, что бурые угли по сравнению с каменными характеризуются повышенной реакционной способностью по

ТАБЛИЦА 5

Результаты термогравиметрического анализа образцов бурых углей, проведенного в окислительной среде

Код образца	$V_{\max}$, %/min	Температурные границы основного разложения, °С				Δm (Δt), мас. %
		T_1	$T_{\max}$	T_2	$\Delta t = T_2 - T_1$	
1	2.07	265	371	669	404	64.5
2	2.02	280	372	696	416	69.0
3	2.08	294	390	707	413	66.0
4	2.15	302	429	708	406	74.2
5	2.02	350	432	845	495	88.5

Примечание. T_1 – температура возгорания угольных частиц; $T_{\max}$ – температура достижения максимальной скорости окисления; T_2 – конечная температура, при которой происходит выгорание коксового остатка; $V_{\max}$ – максимальная скорость окисления при $T_{\max}$; Δt – температурная область окисления; Δm – потеря массы в соответствующем температурном интервале.

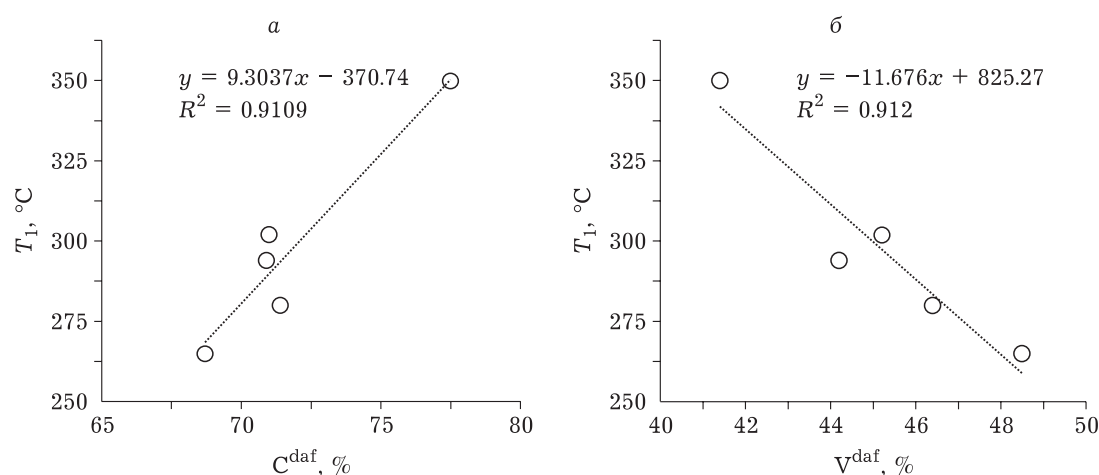


Рис. 5. Зависимость температуры возгорания T_1 бурых углей от их качественных характеристик: содержания углерода в органической массе C^{daf} (а), выхода летучих веществ V^{daf} (б).

отношению к кислороду. Для них характерны достаточно низкие температуры окислительного процесса T_1 , T_{max} , T_2 . Все исследованные образцы бурых углей обладают практически одинаковой и относительно низкой максимальной скоростью окисления $V_{max} \sim 2$ %/мин (см. табл. 5). Например, у низкометаморфизованного каменного угля с показателем отражения витринита $R_{or} = 0.63$ % скорость окислительной деструкции равна 4.27 %/мин [22].

Следует отметить, что с увеличением зрелости бурых углей (увеличение показателя R_{or}) реакционная способность по отношению к кислороду несколько снижается, что выражается в повышении температур окислительного процесса: температуры возгорания угольных частиц T_1 , температуры, при которой достигается максимальная скорость окисления T_{max} , и конечной температуры, при которой происходит выгорание коксового остатка T_2 (см. табл. 5). Повышение температур окислительного процесса связано с изменением основных показателей свойств органической массы бурых углей. Температура возгорания T_1 возрастает при повышении в исследуемых образцах содержания углерода C^{daf} и снижении выхода летучих веществ V^{daf} (рис. 5), а конечная температура окислительного процесса T_2 значимо коррелирует с показателем ароматичности f_a их органической массы (рис. 6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено термогравиметрическое исследование в инертной и окислительной среде пяти образцов бурых углей различных месторожде-

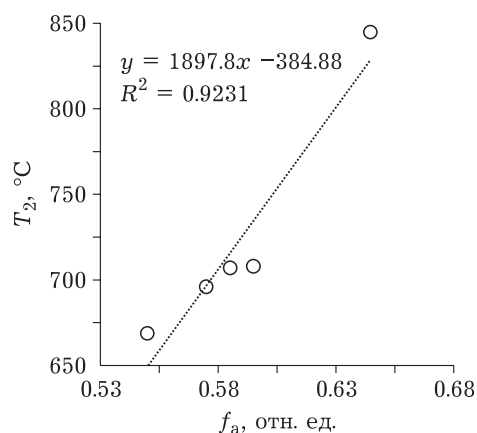


Рис. 6. Зависимость конечной температуры T_2 от показателя ароматичности f_a органической массы бурых углей.

ний России и Монголии. Сравнительный анализ полученных данных позволил установить, что бурый уголь Кангаласского месторождения обладает более высокой термоустойчивостью. Это подтверждается более высоким выходом твердого остатка при пиролизе в инертной атмосфере, более низким выходом летучих веществ, а также наличием максимума термохимического разложения угольного вещества в области более высоких температур.

Определены температурные границы (T_1 – температура возгорания частиц, T_2 – конечная температура, при которой происходит выгорание коксового остатка) области термической деструкции в окислительной среде органической массы исследованных бурых углей. Установлено, что температура возгорания T_1 возрастает при повышении в исследуемых образцах содер-

жания углерода и снижении выхода летучих веществ, а конечная температура окислительного процесса T_2 значимо коррелирует с показателем ароматичности их органической массы.

Полученные результаты могут представлять интерес для расширения сферы практического применения бурых углей в процессах термохимической переработки и при их сжигании.

Работа выполнена с использованием оборудования Кемеровского центра коллективного пользования ФИЦ УУХ СО РАН.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ИУХМ ФИЦ УУХ СО РАН за помощь в выполнении и обсуждении результатов анализов: В. А. Зубакиной (технический анализ), Т. Г. Вычиковой (элементный состав), Н. А. Грабовой (петрографический анализ), С. Ю. Лырщикова (спектроскопия ЯМР).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Воробьев Б. М. Уголь мира. Т. III. М.: Изд-во Горная книга, 2013. 752 с.
- 2 Миронов К. В. Справочник геолога-угольщика. М.: Недра, 1991. 363 с.
- 3 Дангаа О., Сыроежко А. М., Славосhevская Н. В., Страхов В. М. // Кокс и химия. 2010. № 3. С. 26–32.
- 4 Копылов Н. И., Каминский Ю. Д., Дугаржав Ж., Авид Б., Головкин А. К., Патрушев Ю. В. // Химия уст. разв. 2015. Т. 23, № 1. С. 39–47.
- 5 Патраков Ю. Ф., Федорова Н. И. // Химия тв. топлива. 2011. № 5. С. 3–10.
- 6 Школлер М. Б. Полукоксование каменных и бурых углей. Новокузнецк: Инженерная академия России, Кузбас. филиал, 2001. 235 с.
- 7 Николаева Л. А., Латышева В. Г., Буренина О. Н. // Химия тв. топлива. 2009. № 2. С. 55–59.
- 8 Мухин В. М., Клушин В. Н. Производство и применение углеродных сорбентов. М.: Рос. хим.-технол. ун-т им. Д.И. Менделеева, 2012. 308 с.
- 9 Кузнецов П. Н., Каменский Е. С., Колесникова С. М., Кузнецова Л. И. // Химия тв. топлива. 2014. № 4. С. 51–57.
- 10 Головина В. В., Еремина А. О., Чесноков Н. В., Соболев А. А. // Химия тв. топлива. 2018. № 4. С. 34–40.
- 11 Малолетнев А. С., Мазнева О. А., Наумов К. И. // Химия тв. топлива. 2015. № 6. С. 35–39.
- 12 Патраков Ю. Ф., Федорова Н. И., Семенова С. А. // Химия тв. топлива. 2007. № 4. С. 3–8.
- 13 Михалев И. О., Исламов С. Р. // Вестн. Санкт-Петербург. ун-та информ. технологий, механики и оптики. 2009. № 4 (62). С. 75–81.
- 14 Дангаа Оюунболд, Сыроежко А. М., Проскуряков В. А., Шарав Монхжаргал // Хим. пром-ть. 2005. Т. 82, № 4. С. 185–197.
- 15 Жеребцов С. И., Малышенко Н. В., Вотолин К. С., Андрюханов В. А., Соколов Д. А., Дугаржав Ж., Исмагилов З. Р. // Химия тв. топлива. 2019. № 3. С. 19–25.
- 16 Патраков Ю. Ф., Федорова Н. И. // Уголь. 2000. № 2. С. 60–61.
- 17 Бадамсурэн Хоохорын. Оценка недропользования на горных предприятиях Монголии. М.: Изд-во Моск. гос. гор. ун-та, 2004. 390 с.
- 18 Артемьев В. Б., Еремин И. В., Гагарин С. Г. Петрография углей и их эффективное использование. М.: Недра коммюникейшенс ЛТД, 2000. 334 с.
- 19 Федяева О. Н., Патраков Ю. Ф. // Химия тв. топлива. 2004. № 5. С. 24–31.
- 20 Марыгынова В. В., Шайдак Л., Цынкалова Л. Ю. // Природопользование. 2010. Вып. 18. С. 185–191.
- 21 Федорова Н. И., Хицова Л. М., Малышева В. Ю., Исмагилов З. Р. // Химия уст. разв. 2017. Т. 25, № 3. С. 321–326.
- 22 Федорова Н. И., Хицова Л. М., Исмагилов З. Р. // Химия уст. разв. 2018. Т. 26, № 2. С. 217–224.