

УДК 662.8662.75.662.73

КРИТЕРИИ ВЫБОРА УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ – СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ ДЛЯ СОЗДАНИЯ В РОССИИ ЗАВОДОВ ПО ПРОИЗВОДСТВУ СИНТЕТИЧЕСКИХ ЖИДКИХ ТОПЛИВ

© 2020 г. М. Я. Шпирт^{1,*}, Е. Г. Горлов^{1,**}, А. В. Шумовский^{1,***}

¹ ФГУП Институт горючих ископаемых – научно-технический центр по комплексной переработке твердых горючих ископаемых, 119071 Москва, Россия

*e-mail: shpirt@yandex.ru

**e-mail: gorloveg@mail.ru

***e-mail: a.shumovsky@yandex.ru

Поступила в редакцию 29.04.2019 г.

После доработки 01.08.2019 г.

Принята к публикации 04.10.2019 г.

Выявлены зависимости показателей реакционной способности углей от основных геологогенетических факторов: петрографического состава, стадии углефикации, степени окисленности–восстановленности углей, содержания и состава в них минеральных компонентов. На этой основе предложен свод показателей (критериев) для оценки степени пригодности углей для деструктивной переработки.

Ключевые слова: классификация, критерии, угли, месторождения, переработка, синтетические жидкие топлива

DOI: 10.31857/S0023117720010089

ВВЕДЕНИЕ

Россия располагает почти 20% мировых запасов угля. В настоящее время разведанные запасы угля в стране составляют около 200 млрд т, в том числе: бурого 101.2; каменного 85.3 и антрацитов 6.8. Однако энергетическая независимость стран определяется не столько запасами принадлежащих им энергоносителей, сколько наличием экономически выгодных и экологически максимально безопасных технологий их переработки в тепловую энергию и продукты разнообразного функционального назначения.

Горно-геологические условия залегания добываемых углей, их качественные характеристики и расположение основных разрабатываемых угольных месторождений по отношению к отечественным потребителям и морским портам не являются благоприятными как с точки зрения внутреннего потребления, так и для экспорта: внутреннее потребление угля ограничено, а экспорт угля нестабилен, так как подвержен колебаниям мировых цен. Добываемый на предприятиях отрасли уголь во многих случаях не отвечает требованиям потребителей по таким качественным параметрам, как зольность, влажность, содержание серы и гранулометрический состав, что приводит к ухудшению показателей работы энергетических установок, дополнительному расходу топлива и загрязнению окружающей среды отходами и

вредными выбросами. Вещественный (компонентный) состав углей позволяет использовать их в качестве технологического сырья для переработки, в результате которой могут быть получены продукты различного назначения, поэтому актуальны исследования и разработки в области создания новых для сферы угледобычи ниш использования продукции. Одна из таких ниш – это использование углей в качестве сырья для получения синтетических жидких топлив (СЖТ): построено и работает более 150 промышленных установок газификации угля различного назначения (для энергетики, для синтеза метанола, аммиака, СЖТ и др. углеводородов) [1] и несколько крупных (0.7–7 млн т/г) заводов синтеза моторных топлив из синтез-газа, получаемого конверсией природного газа и попутных газов нефтедобычи и нефтепереработки [2].

В основном в мире развиваются три направления производства СЖТ из углей: прямое ожижение (каталитическая гидрогенизация), косвенное ожижение (газификация с последующим синтезом СЖТ из синтез-газа) и пиролиз [3–5].

Наиболее распространенные технологии получения СЖТ из угля:

прямое ожижение (гидрогенизация) – превращение органической массы угля под давлением водорода (до 300 атм) в жидкие и газообразные продукты в присутствии катализатора в среде раство-

Таблица 1. Критерии оценки степени пригодности гумусовых углей для гидрогенизации

Группа по степени пригодности для гидрогенизации	Зольность A^d , %	Содержание фюзинита, об. %	Показатель отражения витринита, R_o , %	Карбоксидное число, % ($C_o = 10K^{daf}/H^{daf}$)	Химический состав золы, %
1. Угли наиболее пригодные	<10	<5	0.4–0.75	<10	$\Sigma_1 = Na_2O + K_2O < 3$ $\Sigma_2 = Fe_2O_3 + CaO + MgO + TiO_2 + SO_3/Na_2O + K_2O > 2$
2. Угли пригодные	10–15	5–10	0.3–0.95	10–12.5	$\Sigma_1 > 3 < 6; \Sigma_2 > 1 < 2$
3. Угли малопригодные и практически непригодные	>15	>15	<0.3 и >0.95	>12.5	$\Sigma_1 > 6; \Sigma_2 < 1$

Примечание. Содержание фюзинита для бурых углей определяется по ГОСТ 12112-78, для каменных – по ГОСТ 9414-74. Величина K^{daf} – сумма ОН-групп, определяемая по ГОСТ 8930-79, мг-экв./г.

рителя при температуре до 500°C, с последующим гидрооблагораживанием полученных продуктов;

косвенная конверсия, включающая стадии газификации угля для получения синтез-газа и последующего каталитического синтеза углеводородов (процесс Фишера–Тропша).

Для гидрогенизации пригодны бурые и малометаморфизованные каменные угли преимущественно витринитового состава, в косвенной конверсии используются угли всех стадий метаморфизма.

Для получения СЖТ из углей в нашей стране разрабатываются критерии комплекса показателей, позволяющие осуществить квалифицированный выбор месторождений, пригодных для использования в качестве источников сырья для промышленных предприятий.

В настоящее время в Российской Федерации действует единая промышленная классификация характеристик углей (ГОСТ 25543-88), которая позволяет по значениям генетических и технологических параметров определять направление их использования. Однако эта классификация не дает возможности оценить пригодность углей как сырьевого ресурса для процессов получения синтетических жидких топлив. Информация, касающаяся оценок пригодности тех или иных типов углей для переработки в СЖТ, содержится в ряде публикаций, например [6–9], однако она носит фрагментарный характер и не дает полного представления по существу проблемы.

В ИГИ выполнен комплекс исследований и экспериментов по получению синтетических топлив из углей различных месторождений России прямой гидрогенизацией и косвенной конверсией (газификация + процесс Фишера–Тропша), позволивший выявить зависимости показателей реакционной способности углей от основных геологических факторов: петрографического состава, стадии углефикации, степени окисленности–восстановленности углей, содержания и состава в них минеральных компо-

нентов. На этой основе предложен свод показателей (критериев) для оценки степени пригодности углей для деструктивной переработки.

Установлено, что пригодность гумусовых углей для гидрогенизации определяется по четырем основным параметрам (табл. 1): зольности, содержанию инертного при гидрогенизации мацерала фюзинита, показателю отражения витринита (гуминита), показателю степени окисленности–восстановленности – карбоксидному числу (вычисляемому из калиевого числа, суммарного содержания ОН-групп или элементного состава) и двум дополнительным показателям из химического состава золы углей (1, 2).

По значению этих параметров угли делятся на три группы по степени пригодности к ожижению: наиболее пригодные; пригодные; малопригодные и практически не пригодные.

Из этих критериев следует, что для гидрогенизации по методу ИГИ из гумусовых углей пригодны неокисленные витринитовые бурые или низкометаморфизованные каменные угли следующих марок: Б, Д, ДГ, Г, ГЖ; групп и подгрупп (по ГОСТ 25543-88): 2БВ, 3БВ, ДВ, ДГВ, 1ГВ, 1ГЖ, 2ГЖ с зольностью до 15% при условии, что содержание суммы Σ_1 оксидов натрия и калия в золе не превышает 6%, а соотношение оксидов химического состава золы каталитического действия к оксидам ингибирующего и нейтрального действия Σ_2 не менее 1.0%; с содержанием мацералов фюзинита до 15%; с показателем отражения витринита от 0.3 до 0.95% и показателем степени окисленности–восстановленности – карбоксидным числом до 12.5%.

Наиболее пригодные для гидрогенизации угли имеют следующие показатели (%): зольность до 10, содержание мацералов группы фюзинита до 5, показатель отражения витринита от 0.4 до 0.75, карбоксидное число до 10, Σ_1 менее 3, Σ_2 более 2.

Угли, содержащие собственно фюзинита более 15% и имеющие зольность также более 15%,

Таблица 2. Сравнительные показатели сырьевой базы процессов гидрогенизации углей

Показатель сырья (угля)	Процесс <i>H-Coal</i> (доработан Шеньхуа, КНР)	Процесс <i>IGOR</i> (Германия)	Процесс ИГИ (Россия)
Влажность, мас. %	Не более 10	Не более 10	Не более 2
Зольность, мас. %;	Не более 7	Не более 5	Не более 12 (бурые угли) Не более 5–7 (каменные угли)
Летучие, мас. %	35–46	35–46	35–46
Петрографический состав, %			
Витринит	Не менее 85	Не менее 75	Не менее 85
Инертинит	Не указано	Не указано	Не более 15

при прочих благоприятных условиях могут представлять интерес для гидрогенизации после обогащения их по этим составляющим. В табл. 2 представлено сопоставление полученных результатов с данными о сырье известных реализованных процессов гидрогенизации углей.

В России разведаны значительные запасы бурых и каменных углей, в том числе низкосортных, которые могут рассматриваться в качестве исходного сырья для производства из них СЖТ методом газификации. Критерии, на основании которых можно сделать выбор месторождений, угли которых являются наиболее перспективным исходным твердым топливом для газификации, должны отражать технологические свойства углей, определяющие их перспективность в качестве исходного сырья для газификации, технико-экономические показатели их добычи и географическое расположение месторождений.

Суммарные затраты на получение 1000 МДж тепла в виде газообразного топлива газификацией 1 т углей (Z_0) можно оценить по соотношению

$$Z_0 = (Z_1 \cdot K_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 \cdot S_i^r \cdot 10^{-2} + Z_5 \cdot A^r \cdot 10^2) : (Q_i^r \cdot K_2), \quad (1)$$

где Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5 – соответственно, затраты на добычу 1 т угля, на транспорт к месту газификации, непосредственно на переработку в газогенераторе, на улавливание 1 т серы и 1 т золошлаковых отходов, руб/т; K_1 – коэффициент, определяющий цену 1 т угля в зависимости от затрат на его добычу; S_i^r, A^r, Q_i^r – соответственно, содержание серы (%), зольность угля (%), низшая теплота сгорания (МДж/кг); K_2 – относительное количество тепла, переходящее при газификации из 1 т угля в газообразные продукты (дол. ед.).

Угли различных марок отличаются по реакционной способности при газификации (V_i). Очевидно, одинаковые величины K_2 при газификации углей, отличающиеся величинами V_i , могут достигаться за счет разного времени (τ) пребывания угля в газогенераторе и затраты непосред-

ственно на газификацию (Z_3) обратно пропорционально величинам V_i . Затраты на транспорт углей, очевидно, зависят от расстояния их перевозки от места добычи до места расположения установки газификации. Приняв величину K_2 одинаковой для различных углей и нормируя величины Z_2 по затратам на перевозку угля на расстояние 1000 км, соотношение (1) преобразуется в (2) и при газификации непосредственно в месте добычи – в (3):

$$Z_0^c = (Z_1 \cdot K_1 + Z_2 \cdot 0.001 \cdot l_i + Z_3 \cdot V_i^{-1} + Z_4 \cdot S_i^r \cdot 10^{-2} + Z_5 \cdot A^r \cdot 10^{-2}) : Q_i^r, \quad (2)$$

$$Z_{0i}^c = (Z_1 \cdot K_1 + Z_3 \cdot V_i^{-1} + Z_4 \cdot S_i^r \cdot 10^{-2} + Z_5 \cdot A^r \cdot 10^{-2}) : Q_i^r, \quad (3)$$

где l_i – расстояние транспортировки угля; V_i – реакционная способность угля при газификации.

Бурые угли, как правило, не перевозятся на большие расстояния, и для оценки сравнительной эффективности их газификации можно использовать только соотношение (3). Величины K_1 в условиях рыночной экономики неодинаковы при добыче углей в различных бассейнах и месторождениях. Следовательно, качественными критериями оценки перспективности углей как исходного сырья для газификации являются помимо себестоимости добычи Q_i^r, S_i^r, A^r , реакционная способность V_i и Z_i . Качественные критерии технологических свойств углей представлены показателями, суммированными в табл. 3.

Для процессов газификации пригодны угли различного состава, в том числе низкосортные. Выбор месторождений, угли которых являются наиболее перспективным исходным твердым топливом для газификации, можно сделать на основе разработанных и предложенных критериев. Согласно предложенной системе критериев, можно оценить в первом приближении эффективность использования углей в качестве исходного сырья для газификации, которая уменьшается от 1-й к 3-й группе (табл. 4).

Таблица 3. Критерии сравнительной эффективности газификации низкосортных углей в зависимости от их состава и свойств

Обозначение	Индексация (величин критериев для каждой группы)		
	Содержание серы, S_i^r , %		
P_S	$1P_S (<0.5)$	$2P_S (0.5-1.0)$	$3P_S (>1.5)$
P_A	$1P_A (<10)$	$2P_A (10-20)$	$3P_A (>20)$
P_t	$1P_t (>15)$	$2P_t (10-15)$	$3P_t (<10)$
P_v	$1P_v (\geq 4)$	$2P_v (4-1)$	$3P_v (\leq 1)$
P_m	$1P_m (<50)$	$2P_m (50-150)$	$3P_m (>150)$

* Относительные скорости реагирования при газификации приняты для бурых, низкометаморфизованных каменных углей (Д-Г) и антрацитов, соответственно, >4; 4-1 и <1.

Таблица 4. Эффективность использования углей в качестве исходного сырья для газификации

№	Бассейн, месторождение, предприятие	Марка угля	Теплота сгорания		Содержание, %		Зольность, %		Скорость реагирования, усл. ед.	Заграты на добычу	
			Q , МДж/кг	P_t	S	P_S	A^r	P_A		P_v	руб/т
1	Канско-Ачинский, разрез Ирша-Бородинский	Б2	15.3	$1P_t$	0.2	$1P_S$	7.4	$1P_A$	$1P_v$	32	$1P_m$
2	Канско-Ачинский, разрез Бапахтинский	Б2	17.1	$1P_t$	0.1	$1P_S$	4.8	$1P_A$	$1P_v$	40	$1P_m$
3	Канско-Ачинский, разрез Ирбейский	Б3	17.5	$1P_t$	0.2	$1P_S$	11.0	$2P_A$	$1P_v$	—	$1P_m$
4	Канско-Ачинский, разрез Березовский	Б2	15.7	$1P_t$	0.2	$1P_S$	4.7	$1P_A$	$1P_v$	47	$1P_m$
5	Канско-Ачинский, разрез Назаровский	Б2	12.9	$2P_t$	0.4	$1P_S$	7.9	$1P_A$	$1P_v$	48	$1P_m$
6	Канско-Ачинский, разрез Итатский	Б1	12.8	$2P_t$	0.4	$1P_S$	6.8	$1P_A$	$1P_v$	127	$2P_m$
7	Канско-Ачинский, разрез Абанский	Б2	14.7	$2P_t$	0.3	$1P_S$	8.0	$1P_A$	$1P_v$	46	$1P_m$
8	Большесырский, разрез Большесырский	Б3	19.0	$1P_t$	0.2	$1P_S$	6.0	$1P_A$	$1P_v$	—	—
9	Иркутский бассейн, разрез Мугунский	Б3	17.3	$1P_t$	0.9	$2P_S$	15.6	$2P_A$	$1P_v$	55	$2P_m$
10	Азейское, разрез Азейский	Б3	16.0	$1P_t$	0.4	$1P_S$	16.5	$2P_A$	$1P_v$	51	$2P_m$
11	Ленский, разрез Кангаласский	Б2	15.3	$1P_t$	0.4	$1P_S$	10.5	$2P_A$	$1P_v$	128	$2P_m$
12	Уртуйское, Приаргунское ПГХО	Б3	16.8	$1P_t$	0.3	$1P_S$	8.8	$1P_A$	$1P_v$	—	—
13	Черемховское	Д	16.4	$1P_t$	1.0	$2P_S$	28.9	$3P_A$	$2P_v$	128	$2P_m$
14	Татуровское, разрез Восточный	Б2	14.7	$2P_t$	0.2	$1P_S$	10.7	$2P_A$	$1P_v$	82	$2P_m$
15	Райчихинское, разрез Северо-Восточный	Б2	10.4	$2P_t$	0.3	$1P_S$	17.6	$2P_A$	$1P_v$	156	$3P_m$
16	Ерковецкое, разрез Ерковецкий	Б2	11.5	$2P_t$	0.2	$1P_S$	12.4	$2P_A$	$1P_v$	156	$3P_m$
17	Бикинское, ЛУТЭК	Б1	7.8	$3P_t$	0.2	$1P_S$	23.0	$3P_A$	$1P_v$	173	$3P_m$
18	Раковское, разрез Раковский	Б1	10.0	$3P_t$	0.3	$1P_S$	14.8	$3P_A$	$1P_v$	107	$2P_m$
19	Павловское, разрез Павловский	Б1	9.5	$3P_t$	0.4	$1P_S$	21.5	$3P_A$	$1P_v$	161	$3P_m$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании разработанных критериев для производства СЖТ газификацией и гидрогенизацией в качестве сырьевых ресурсов можно рекомендовать Серафимовское и Ерунаковское месторождения Кузбасского угольного бассейна, Ишедейское месторождение Иркутского угольного бассейна и Таймыльское месторождение Ленского угольного бассейна.

Разработанная классификация углей различных месторождений позволяет сделать обоснованный выбор конкретных угольных месторождений как сырьевой базы заводов по получению синтетических жидких топлив, а также технологий их переработки.

Реализация этих технологий позволит существенно расширить традиционную углехимическую линейку, обеспечив получение синтетической нефти, высокооктанового бензина, авиационного, ракетного и дизельного топлива, а также нефти, смазочных масел, парафинов, фенолов и другой углехимической продукции — сырья для основного органического синтеза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Славинская Л.* // Нефтегазовая Вертикаль. 2011. № 18. С. 13.
2. *Кузнецов А.М., Савельев В.И., Бахтизина Н.В.* // Научн.-техн. вестн. ОАО "НК "РОСНЕФТЬ". 2012. С. 44.
3. *Алексеев К.Ю., Горлов Е.Г., Шумовский А.В.* // Уголь. Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. 2013. Вып. 5. С. 15.
4. *Малолетнев А.С., Шпирт М.Я.* // Росс. хим. журн. 2008. Т. LII. № 6. С. 44.
5. *Бакурова Е.В.* // Уголь. 2016. № 10. С. 46.
6. *Володарский И.Х., Игнатова Н.Н., Шпирт М.Я.* // Юбил. сб. тр. ИГИ. Состояние и перспективы комплексного использования твердых горючих ископаемых. М.: НТК "Трек", 2011. С. 48.
7. *Ческидов В.И., Зайцев Г.Д.* // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. Горное недропользование. 2013. № 6. С. 142.
8. *Куклина Г.Л.* Системная оценка качества ископаемых углей Восточного Забайкалья и их рациональное использование: Дис. ... канд. техн. наук. Чита: Чит. гос. техн. ун-т., 2002. 158 с.
9. *Станкевич А.С., Золотухин Ю.А.* // Черная металлургия. Бюл. научн.-техн. и экономической информации. 2015. Т. 9. С. 15.
10. *Камбарова Г.Б.* // Наука вчера, сегодня, завтра. Сб. статей по матер. XXXIX междунар. науч.-практ. конф. № 10(32). Новосибирск: СибАК, 2016. С. 91.