

УДК 621.039.542.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СЖИГАНИЯ МЕСТНЫХ ТОПЛИВ

¹Худякова Г.И., ¹Рыжков А.Ф., ¹Силин В.Е.,
¹Осипов П.В., ²Зорин М.В., ²Стуков М.И.

¹ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»,
²ООО «Проминтех НКА», г. Екатеринбург

Введение. Рассмотрены особенности воспламенения и выгорания топливных частиц – продуктов термообработки (кокс слоевого коксования), мокрого гранулирования (на основе угольной, торфяной и древесной пыли) и прессования (древесные пеллеты), для выявления и исследования кинетики термохимической конверсии.

Основной сегмент применения низкосортных топлив, носящих, как правило, местный характер, – установки региональной, промышленной и коммунальной энергетики. Значительная часть этих установок работает по технологиям низкотемпературного сжигания (вихревым, слоевым – в плотном и кипящем слое), при котором гетерогенный переход органической части топлива из твердого состояния в газообразное протекает в низкотемпературном нефорсированном режиме с сохранением минеральной части в твердом виде. Такой режим, устойчиво реализуемый при горении высокорреакционных малотеплоплотных топлив со значительной долей химического и механического балласта (кислород, зола, влага), позволяет разрабатывать для установок региональной и малой энергетики экологически нейтральные способы сжигания без привлечения дополнительных ресурсов (активирующих твердых и жидких присадок, энергетических воздействий и т.п.). Однако исторически сложилось, что изученность низкотемпературного сжигания топлив и топливных отходов рабочего состава в России оказалась существенно ниже, чем более молодого высокотемпературного (факельного), являющегося основным для подавляющего большинства крупных отечественных энергетических агрегатов, использующих в том числе и местное топливо, а в малых установках находят применение простейшие способы, характеризующиеся как правило низкими технологическими и экологическими показателями. Поэтому работы по низкотемпературному горению, выполненные в свое время для ряда натуральных топлив, не только не теряют актуальности, но и нуждаются в дальнейшем развитии с привлечением современных методов исследования.

Горение индивидуальной частицы (ИЧ), слоевое и пылеугольное сжигание в определенных вопросах допустимо оценивать с единых позиций. Интенсивность теплообмена частиц, горящих в кипящем слое инерта, близка к интенсивности для ИЧ. Экспериментальные данные по низкотемпературному горению ИЧ могут быть использованы для анализа термохимической подготовки крупных частиц в топках с плотным и кипящим слоем, газогенераторах и предтопках с предварительной термоподготовкой топлива.

Методика эксперимента. Ряд топлив (табл. 1) естественного происхождения (Волчанский бурый уголь – ВБУ, торф, биомасса), продукты термообра-

ботки (коксы слоевого коксования, древесный уголь) и ряд композитных топливных частиц (влажные гранулы на основе угольной, торфяной и древесной пыли) и прессования (древесные пеллеты) с различающимися значениями плотности, влажности и зольности. Проводились эксперименты по топливам 1–7, топлива 8–11 были исследованы ранее [1]. По зольности топлива делятся на: высокозольные (ВБУ, гранулы из пыли ВБУ), среднезольные (кокс 2 и 3, гранулы из торфяной пыли) и малозольные высокорреакционные (кокс 1, древесина, древесный уголь, косточка, гранулы из древесной пыли, пеллеты), в условиях воздушного процесса.

Таблица 1. Характеристики исследуемых топлив

№ пп	Топливо	Рабочая влажность W_i^r , %	Зольность на сухую массу A^d , %	Выход летучих веществ V^{daf} , %	Низшая теплота сгорания Q_i^r , МДж/кг	Кажущаяся плотность при рабочей влажности ρ_i^r , кг/м ³	Эквивалентный размер частиц, d мм	Температура среды, Tм, °С
1	ВБУ	20	40,5	31,9	10,63	1450	0,4-2,5	430-900
2	Кокс 1	3	1	1	32,7	820	14×14×14	850
3	Кокс 2	0,6	6,5	1	32,3	874	14×14×14	850
4	Кокс 3	0,4	12	1	31,8	834	14×14×14	850
5	Гранула из пыли ВБУ	30	46	27	10,63	1154	15	400-800
6	Гранула из древесной шлифпыли	65	1	85	12,6	987	15	400-800
7	Гранула из торфяной пыли	70	9	70	16,5	870	15	400-800
8	Древесина разных пород	8-12	1	85-88	10,2-18,1	450-690	3-80	100-1200
9	Древесный уголь (ГОСТ 7657-84)	1,4	0,9	15	31,5	380	3-80	100-1200
10	Косточка	4	0,97	85	18,9	1150	10	100-1200
11	Пеллета	10	2	87	17,5	1200	13	100-1200

Выбор ВБУ марки БЗ обусловлен близостью его свойств с углями Северо-Сосьвинского угленосного района, рассматриваемыми в качестве основного энергетического ресурса для перспективного развития Полярного и Приполярного Урала, по данным УралВТИ. Экспериментальные исследования свойств этих углей затруднены отсутствием достаточного количества промышленно добываемого материала. По составу ВБУ близок к Оторьинскому, отличается несколько большей степенью окисленности, меньшей долей в золе оксидов железа, титана, кальция, магния, большей – оксида алюминия. При сравнении физико-химических характеристик углей ВБУ и Северо-Сосьвинских месторождений заметно отличие в зольности. Для получения из исходного угля, с размером частиц от 0,4-2,5 мм и зольностью $A^d = 40,5$ %, концентрата с пониженной зольностью использовали метод разделения угля в тяжелой жидкости. Массовая доля

всплывшего концентрата составила 47%, утонувших отходов – 53 %. На второй стадии – получения кокосов, образцы вводили в реактор кипящего слоя при температуре 900 °С в токе инертного газа, выдерживали 7 минут (как в стандартных условиях определения выхода летучих) и охлаждали в инертной среде. Характеристики образцов углей и их коксовых остатков представлены в табл. 2.

Таблица 2. Характеристики образцов ВБУ

Образцы Волчанского угля	Уголь для установки «Пиролиз-М»			Коксовый остаток для установки «РСК-1»		
	A ^d , %	V ^d , %	ρ, кг/м ³	A ^d , %	V ^d , %	ρ, кг/м ³
Малозольный концентрат (ВБУ ₋)	10,8	40,0	1300	15,0	8,3	700
Исходный уголь (ВБУ)	40,5	31,9	1450	48,1	8,9	900
Высокозольные отходы (ВБУ ₊)	68,0	26,7	1750	79,0	1,6	1250

Образцы коксов получены от ООО «Проминтех НКА» для исследования их поведения в металлургических печах: «кокс 1» – кокс из нефтяной коксующей добавки (ДК), «кокс 2» – производственный кокс Губахинского коксохимзавода с добавкой к угольной шихте 50 % ДК и «кокс 3» – производственный кокс Кемеровского коксохимзавода из 100% кузнецких углей. Образцы получены путем совместного или индивидуального пиролиза угольной шихты и ДК и последующего дробления до фракции 19–22,4 мм. Исследования проводились при температуре 800-900 °С – оптимальной для связывания серы.

Топливные гранулы, получаемые из суспензии, находящейся на пределе текучести, и помещаемые после формовки в разогретый муфель, позволяют определить влияние горючего наполнителя на динамику выгорания. Характерной особенностью исследуемого процесса является сохранение формы гранулы в течение всего времени выгорания. Пластичность контактов между отдельными зернами в грануле снимает накапливающиеся при термической усадке разрушающие напряжения. В то же время прочности создаваемых при усадке и последующем обжиге межчастичных контактов оказывается достаточно, чтобы минеральный каркас сохранял свою форму в течение всего процесса озоления. Гранула угля моделировала «каплю» аналогичного по зольности и влажности отхода мокрого углеобогащения, забрасываемую в топку кипящего слоя.

Исследования поставлены в развитие технологии сжигания отходов мокрого углеобогащения Кизеловского угля с рабочей зольностью 49%, отработанного на модифицированном котле ДКВР-4-13 с топкой КС на одном из углепредприятий Среднего Урала. Отличительным признаком технологии является пониженный пылеунос, обусловленный отсутствием значительных разрушений топливной «капли» при забрасывании и выгорании ее в промышленной топке [2].

В опытах по определению динамики выгорания индивидуальных частиц образец диаметром более 10 мм размещался (центрировался) на корольке термопары (тип ХА, диаметр королька – 1 мм) и вносился в предварительно нагретый до заданной температуры (100, 200, ... 1200 °С с точностью ±20 °С) муфель. Изменялись температуры печи (Т_п), поверхности (Т_п) и центра образца (Т_ц) за время процесса (τ). Эксперименты проводились при нормальных условиях с закрытым непродуваемым муфелем принимали скорость потока воздуха $w = 0$ м/с.

Средняя эффективная скорость горения коксозольного остатка (КЗО) определялись как убыль расчетной массы КЗО с единицы поверхности эквивалентной сферы (по начальному размеру) за время выгорания КЗО ($\text{кг}/\text{м}^2\text{с}$)

$$j = \Delta M / (\Delta t_{\text{КЗО}} \cdot F) .$$

При обработке ставилась задача нахождения средней скорости конверсии за полное время выгорания, а основной упор в экспериментах делался на «ранжирование» исследуемых топлив по определяемым параметрам при одинаковом уровне систематических погрешностей. В качестве оценочных рассматривались кинетический и диффузионный режимы горения. Температурная граница между ними зависит от интенсивности массообмена и для наиболее реакционных топлив в малоподвижной среде ($w = 0$) оценивается в 500°C .

Экспериментальное исследование совокупности топливных частиц включало изучение динамики выгорания коксового остатка при температурах $430\text{--}490^\circ\text{C}$ по импульсной методике на установке РСК-1 и исходных углей при $780\text{--}910^\circ\text{C}$ на динамической установке «Пиролиз-М» Института угольных энерготехнологий НАН Украины при скорости продувки (псевдооживления) $0,2\text{--}0,6$ м/с [3,4]. Значения удельной (на текущую массу) скорости реагирования (W_m) и степени конверсии углерода (X) определялись по данным газового анализа с учетом расхода газа-носителя, начальной массы и зольности навески. Оценка кинетических характеристик горения коксов ВБУ различных фракций и зольности выполнялась по максимальным значениям W_m .

Воспламенение топлив. В низкотемпературном диапазоне ($T_M = 250\text{--}500^\circ\text{C}$) разогрев влажных гранул происходит с запаздыванием из-за процесса сушки (рис. 1а), наименьшее запаздывание – у гранулы с минимальной начальной влажностью (уголь). Затем повторяется сценарий, характерный для сухих топлив (древесный уголь): с момента заброса в печь и до начала пиролиза частицы под действием излучения муфеля прогреваются как химически инертное тело, далее топлива, вступают во вторую стадию – бурного окисления с интенсивным сомогревом (по экспоненциальному закону) вплоть до перехода к квазистационарному режиму выгорания КЗО.

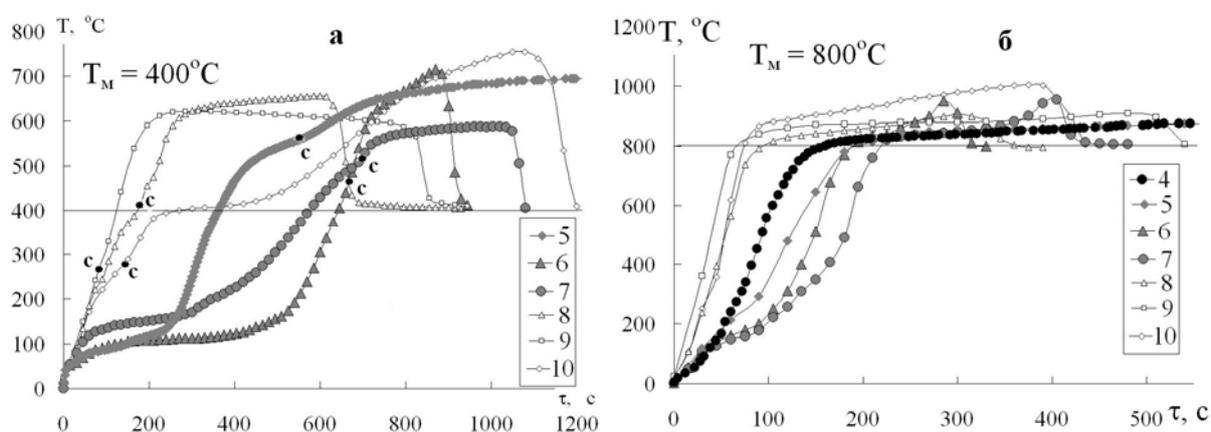


Рис. 1. Термограммы переходного процесса в частице при T а) 400°C , б) 800°C , температура центра частицы T , $^\circ\text{C}$; время с момента внесения частицы в муфель τ , с; точка «с» – завершение активного выхода летучих, обозначения по табл. 1.

Саморазогрев влажных гранул (уголь) начинается при меньшей температуре печного пространства (300 °С), чем сухих частиц (370–400 °С), а перегрев древесной гранулы – выше, чем древесины. Подобное явление хорошо известно и научно обосновано при сжигании антрацита. У угольной гранулы активный выход летучих завершается в точке «с» при температуре 550 °С. Характерно, что горение КЗО угольной гранулы начинается по времени раньше, чем более реакционной сухой косточки, обремененной жидкофазным переходом.

В высокотемпературном диапазоне (при температуре муфеля 800 °С) специфика прогрева и воспламенения различных топлив нивелируется. «Запаздывание» прогрева топливных частиц относительно древесного угля уменьшается, а перегревы к концу саморазогрева и скорости горения КЗО на основном участке сближаются. Главным фактором замедления процесса воспламенения здесь выступает влажность, заметно затягивающая выход летучих во времени на что указывалось еще Г.Н. Деягиным. Подчиненный характер качественно различных сценариев пиролиза рассматриваемых топлив при близком количественном результате по интенсивности горения хорошо соотносится с известным опытом высокотемпературного сжигания углей.

Выгорание коксозольного остатка. В низкотемпературном диапазоне низкорреакционные топлива (кокс) ведут себя подобно химически инертным телам ($\Delta T = 0$). После разогрева до 700 °С в них развивается беспламенное горение с перегревом, проявляющееся в виде свечения. При этом горение КЗО высокорреакционных топлив не зависит от влажности и начинается после выхода основной массы летучих, при температуре $T_{\text{ч}} \approx 300\text{--}400$ °С, а древесного угля с малым содержанием летучих при более низкой температуре $T_{\text{ч}} \approx 250$ °С и протекает со значительным перегревом центра образца относительно среды: $\Delta T = 350\text{--}360$ °С для древесной пыли (гранула) и косточки; 300–320 – для пеллет, древесного и бурого угля (гранула); 220–250 – для торфа (гранула) и древесины. Максимальный фактический перегрев, присущий наиболее реакционным топливам, неплохо коррелирует с расчетом для диффузионного режима горения древесного угля, проведенного с использованием кинетических констант.

При $T_{\text{м}}=800\text{--}850$ °С показатели горения высокорреакционных и низкорреакционных топлив по перегреву меняются местами: $\Delta T = 190\text{--}200$ °С для угле-нефтяных коксов и $\Delta T = 100\text{--}180$ °С для всех высокорреакционных топлив. Отличия от низкорреакционных топлив по перегреву стоит кокс 1 ($\Delta T = 100$ °С). Скорость горения коксов ($\sim 0,2\text{--}0,3$ г/м²с) в 2–5 раз меньше, чем высокорреакционных топлив. По этому показателю коксы занимают последнее место в ряду «древесина – шлифпыль – торф – бурый уголь – коксы». Внутри подгруппы максимальную реакционную способность проявил кокс 3, выгорающий с наибольшими перегревом и скоростью; кокс 1, как наименее реакционноспособный, показал минимальные скорость горения и перегрев.

Динамический процесс саморазогрева КЗО в низкотемпературном диапазоне представляет известный из теории теплового взрыва Н.Н.Семенова переходный процесс, разворачивающийся во времени вдоль кинетической кривой (рис. 2) от начального значения (точка «а») до «излома» в точке «б». Происходящий при этом эволюционный «скачок», условно отраженный стрелками между точками «а» и «б», символизирует переход из кинетической области горения в начале саморазогрева к диффузионной – в конце.

Для высокорекреакционных топлив «излом» по расчету приходится на область температур ~ 500 °С. Такую температуру может приобрести частица, забрасываемая в топку, разогретую до температуры $\sim 250\text{--}300$ °С. При меньших температурах и длительном времени индукции процессы воспламенения носят, как правило, негативный характер (пожары). По сравнению с низкорекреакционными топливами устойчивый кинетический режим горения в обычных условиях не реализуется, а диффузионный переход наступает при низкой температуре реагирования. Это является физической основой для разработки технологий низкотемпературного сжигания/газификации, но одновременно создает методологические трудности при определении кинетических констант процесса.

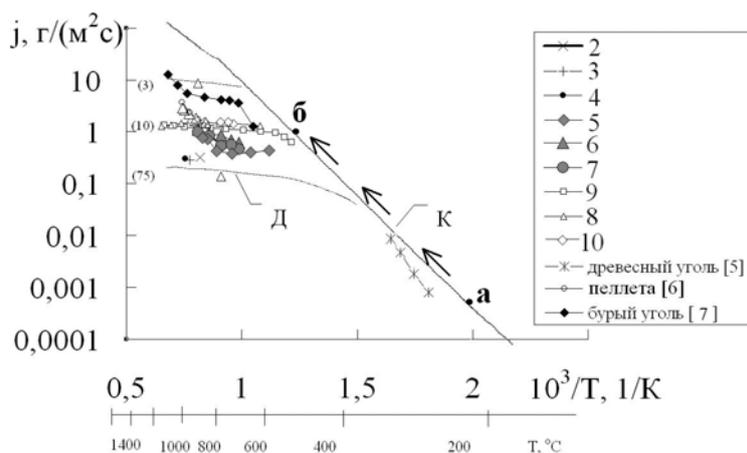


Рис. 2. Зависимость скорости горения частицы j , $\text{г}/(\text{м}^2\text{с})$, от обратной ($1000 / T_c$, $1000 / \text{К}$) и обычной (T_c , °С) температуры частицы, цифры в скобках – диаметр частиц, d_c , мм обозначения по табл. 1. ([5] – древесный уголь Хайкина С.Э.)

Ранее для устойчивой реализации горения реакционного топлива в низкотемпературной области ($T_m = 280\text{--}335$ °С) применяли разбавление воздуха инертном. Полученные таким образом скорости горения древесного угля нанесены на рис. 3. Более информативный и производительный импульсный метод, хорошо зарекомендовавший себя в диапазоне температур $350\text{--}700$ °С при испытаниях ряда украинских и российских углей, применительно к некоторым наиболее высокорекреакционным топливам, к каким, как выяснилось относится ВБУ, плохо работает уже при температуре выше 490 °С. Поэтому для получения данных по кинетике в рабочем диапазоне температур импульсный метод был дополнен другим – одноимпульсным – методом на основе установки «пиролиз – М», с квалифицированным вычленением при обработке скорости гетерогенного кинетического процесса из макрокинетического.

Выгорание коксов ВБУ на установке «Пиролиз-М» проходило в основном во внешнедиффузионной или близкой к ней области реагирования (рис.3).

При работе на импульсной установке было установлено, что во внутридиффузионной области реагирования наблюдаемая энергия активации E_a горения углерода кокса ВБУ составляет 70 кДж/моль, ВБУ₋ – 60 кДж/моль, что меньше, чем для коксов известных топлив, в том числе древесного угля, для которого $E_a = 75\text{--}84$ кДж/моль, по данным Померанцева, а так же Днепровского (Александрийского) бурого угля, близкого по характеристикам к ВБУ. Внутрикинетический режим с $E_a = 177$ кДж/моль был обнаружен лишь для ВБУ₊.

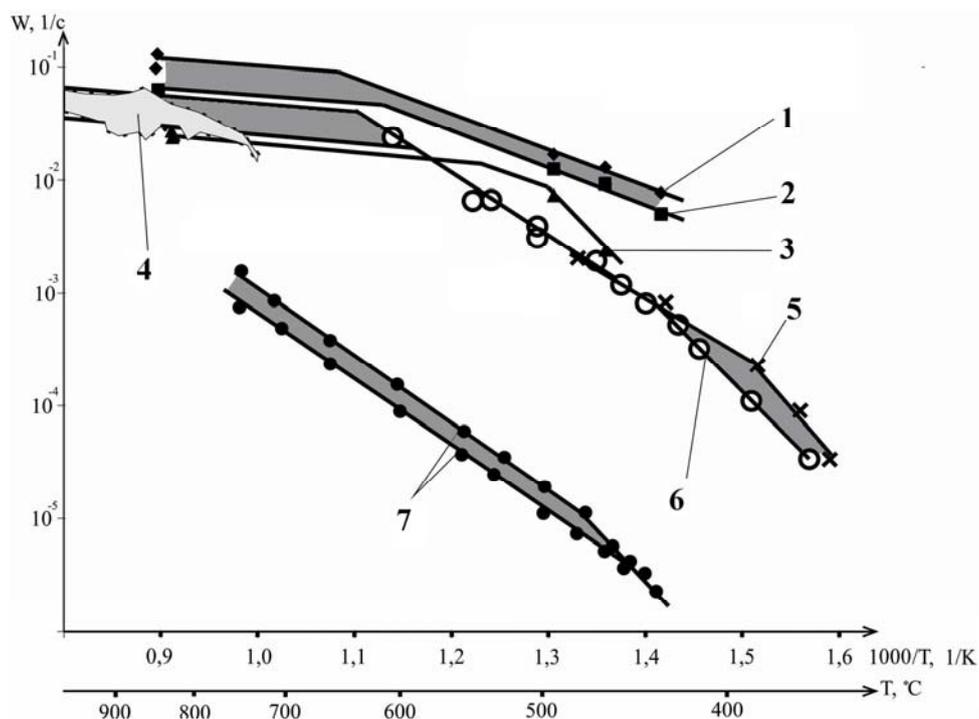


Рис. 3. Зависимость скорости взаимодействия углей и коксов с кислородом воздуха от обратной температуры: Пиролиз-М 1 – (ВБ₋); 2 – (ВБУ); 3 – 2 – (ВБУ₊); 4 – АБ ($A^d=16-18\%$, $d_q=1,0-2,5$ мм)[4]; 5 – АБ ($A^d=9,4\%$, $d_q=1,25-1,6$ мм)[8]; 6 – АБ ($A^d_k=47,3\%$, $p=0,87$ Мпа, $d_q=0,4-0,6$ мм)[3]; 7 – АШ ($A^d_k=46,1\%$, $d_q=0,4-0,6$ мм)[3].

В табл. 3 приведены кинетические характеристики взаимодействия коксов ВБУ с кислородом воздуха в сравнении с аналогичными данными по некоторым украинским углям, полученным на той же установке [3], и некоторым другим.

Таблица. 3. Кинетические характеристики взаимодействия коксов ВБУ и углей

Кинетические характеристики	ВБУ ₋	ВБУ	ВБУ ₊	Д [9]	Древесный уголь	АБ [3]	ГСШ [3]	Л-В(Г) [3]	АШ [3]
E_a'' кДж/моль	-	-	177	-	-	175	176	177	189
E_a' кДж/моль	60	70	-	72	75-84	95-111	114	115	122

Выводы

1. В сравнительно малоизученных режимах низкотемпературного сжигания низкосортных топлив в вихревом, кипящем и плотном слое воспламенение и выгорание в значительной мере определяются как природой и «предысторией» топливных частиц, так и спецификой протекающих при их помещении в топку процессов.

2. Масштабное исследование особенностей выгорания низкосортных топлив различного происхождения показало, что наиболее подходящими для низкотемпературных технологий являются топлива, имеющие низкую температуру воспламенения и высокую удельную скорость горения. Из ископаемых топлив такими оказались волчанские бурые угли и их концентраты.

3. Угли, подобные волчанскому, имеет смысл обогащать и высокорреакционный малозольный продукт с выходом около 70% углерода использовать для вихревого и факельного сжигания, а низкорреакционный высокозольный – для сжигания в КС или ЦКС.

4. По сравнению с угольными, более влажные гранулы торфа и древесины существенно проигрывают по теплоплотности, что приводит при прочих равных условиях к соответствующему снижению поверхностной скорости выгорания, тогда как количество испаряемой воды находится на пределе положительного теплового баланса. При положительном тепловом балансе снижение эффективности сжигания оправдывается назначением сжигания мокрого гранулированного топлива – огневой утилизацией горючих отходов, а подтверждаемый промышленными испытаниями практический эффект свидетельствует о целесообразности применения данного способа в специальных условиях.

6. Представленные образцы коксов слоевого коксования после дробления могут найти применение в слоевых технологиях сжигания: при небольших концентрациях нефтекокса – в установках с плотным слоем, а при необходимости сероподавления – в установках с кипящим слоем.

Литература

1. Силин В.Е., Рыжков А.Ф., Богатова Т.Ф., Надир С.М. Изучение выгорания одиночной частицы биотоплива // Горение твердого топлива: сб. докладов VII Всерос. конф. с междунар. участием, Новосибирск, 10-13 ноября 2009 г. Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2009. Ч.2. С. 134–143.
2. Берг Б.В., Келер В.Р., Подшивалов В.Г., Богатова Т.Ф., Вечеринский Н.Ч. Сжигание высокообводенного топлива в кипящем слое // Промышленная энергетика. 1989. № 5. С. 43-45.
3. Майстренко О.Ю. Основні закономірності горіння та газифікації високозольного вугілля в різних модифікаціях кипячого шару: Автореф. дис. ... д-ра техн. Наук. – Київ, 1999. – 35 с.
4. Дулиенко С.Г., Косячков А.В., Чернявский Н.В. Динамика конверсии днепровского бурого угля в кипящем слое // Экотехнологии и ресурсосбережение. – №5. – 2005. – С.3-12.
5. Хитрин Л. И. Физика горения и взрыва. М.: Изд. АН СССР, 1955. 442 с.
6. Palchonok G., Leckner B., Tullin C., Martinsson L., Borodulya A. Combustion characteristics of wood pellets // PELLETS 2002: Proc. 1st World Pellets Conf. Sept. 2-6, 2002. Stockholm. 2002. p.105-109.
7. Павлюк Е. Ю., Мунц В. А. Моделирование растопки котлов с кипящим слоем // Вестник УГТУ-УПИ: Теплоэнергетика. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. № 3 (33). С. 56–61.
8. Буляндра А.Ф., Майстренко И.А. Особенности взаимодействия коксов александрийских бурых углей с кислородом воздуха // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – №3. – 2010. – С.3-8.
9. Махорин К.Е., Хинкис П.А. Сжигание топлива в псевдооживленном слое. – Киев: Наукова думка, 1989. – 204 с.