

Топливо и энергетика

УДК 662.61.747

Топал А.И.*Институт угольных энерготехнологий НАН Украины, Киев*

Обобщенные результаты экспериментальных исследований термической конверсии топлива различного происхождения

Приведены результаты экспериментальных исследований по определению характеристик выгорания топлив различного происхождения: от высокорекреационных на основе лузги подсолнечника до низкорекреационных на основе термически подготовленного кокса, потенциал использования которых для энергетических целей еще не задействован. Определение основных закономерностей термической конверсии указанных топлив, а также традиционного угля проводилось в ходе осуществления экспериментов по кинетике и динамике выгорания образцов в кислороде воздуха в широком диапазоне температур (400–1000 °С), давлений (0,1–1,2 МПа), размеров частиц (0,1–1,6 мм).

Ключевые слова: уголь, лузга, кокс, сжигание, степень конверсии, энергия активации.

Наведено результати експериментальних досліджень щодо визначення характеристик вигорання палив різного походження: від високореакційних на основі лушпиння соняшнику до низкорекреационних на основі термічно підготовленого коксу, потенціал використання яких для енергетичних цілей ще не задіяний. Визначення основних закономірностей термічної конверсії вказаних палив, а також традиційного вугілля провадилося впродовж здійснення експериментів з кінетики та динаміки вигорання зразків у кисні повітря у широкому діапазоні температур (400–1000 °С), тиску (0,1–1,2 МПа), розмірів частинок (0,1–1,6 мм).

Ключові слова: вугілля, лушпиння, кокс, спалювання, ступінь конверсії, енергія активації.

Вовлечение новых видов топлива в цикл производства тепла и электроэнергии — актуальная задача, стоящая перед энергетическим сектором страны, и ее решение позволит расширить топливную базу энергоустановок и снизить дефицит энергоресурсов. Эффективное использование новых видов топлива, как правило, сопровождается созданием новых конструкций топочных устройств, в ходе проектирования которых необходимы данные об основных закономерностях их термической конверсии. Уточненные данные требуются и для традиционных видов топлива, если процесс их сжигания проходит в новых режимных условиях.

Цель работы — обобщение, сравнительный анализ результатов и определение отличительных особенностей термической конверсии топливных частиц различного происхождения при их выгорании в кислороде воздуха.

В качестве исследуемых были выбраны различные виды топлива с широким диапазоном исходных свойств: высокорекреационные (на основе лузги подсолнечника), традиционные (на основе разных марок каменного угля), низкорекреационные (на основе термически подготовленного металлургического кокса (ТПК)). Отличительные особенности и закономерности выгорания указанных топлив в кислороде воз-

духа, которые учитывались при проектировании топочных устройств, изложены ниже.

Пиролиз и выгорание лузги подсолнечника в условиях кипящего слоя

Лузга подсолнечника — энергосодержащее сырье, которое может с успехом использоваться для получения пара (электрической энергии) при сжигании в топочных камерах парогенераторов. Это позволит эффективно использовать энергетический потенциал лузги как биомассы, которая в значительных количествах ежегодно накапливается на предприятиях пищевой промышленности Украины и, как правило, не находит применения. Однако процесс сжигания лузги в вихревых топках используемых парогенераторов — неоптимальный процесс, сопровождающийся значительными потерями тепла с механическим недожогом.

Цель настоящей работы — исследование динамики выгорания лузги для определения приемлемого времени пребывания ее частиц в топочной камере и обеспечение минимального уровня механического недожога.

Эксперименты по исследованию динамики выгорания частиц лузги подсолнечника проводились на лабораторной установке «РСК-Пиролиз» (кварцевый реактор; внутренний диаметр 0,05 м; высота 0,9 м) в диапазоне температур 500–1000 °С (с шагом 100 °С) при атмосферном давлении в кипящем слое песка мелкой фракции (0,05–0,63 мм), что обеспечивало быстрый нагрев частиц и последующее их реагирование при температуре слоя.

В ходе проведения экспериментов навеска лузги известной массы (0,05–0,10 г) вводилась в предварительно нагретый реактор. На выходе из реактора осуществлялись непрерывный контроль (по масс-спектрометру MX1215) и запись данных в виде зависимостей от времени компонентного состава продуктов сгорания и пиролиза (CO , CO_2 , CH_4 , H_2 , O_2) частиц лузги (динамические кривые выхода) с временным разрешением 1 с. Дальнейший анализ данных позволял судить о динамике образования летучих и выгорании коксового остатка частиц лузги, определить время их выгорания.

Типичные динамические кривые выхода продуктов пиролиза и выгорания коксового остатка представлены на рис.1 для крайних температур из исследуемого диапазона 500 и 1000 °С. Видно, что динамические кривые (по CO_2 и CO) имеют два отличительных экстремальных участка. Первый из них соответствует выгоранию летучих, второй — выгоранию коксового остатка. Первый участок, с меньшим ин-

тервалом времени, имеет ярко выраженный максимум, величина которого резко снижается и выходит на плавно спадающую ветвь, соответствующую выгоранию коксового остатка. Второй участок имеет более длительный временной интервал. Видно, что в условиях достаточного количества кислорода концентрации CH_4 , H_2 намного ниже концентраций CO и CO_2 , что заметно не влияет на процесс пиролиза и выгорание коксового остатка.

Как следует из полученных данных, процесс выгорания коксового остатка при 500–800 °С сопровождается медленным выходом CO_2 на квазистационарный уровень. Данная закономерность проявляется для динамических кривых (особенно для $T = 500\text{--}800$ °С) и свидетельст-

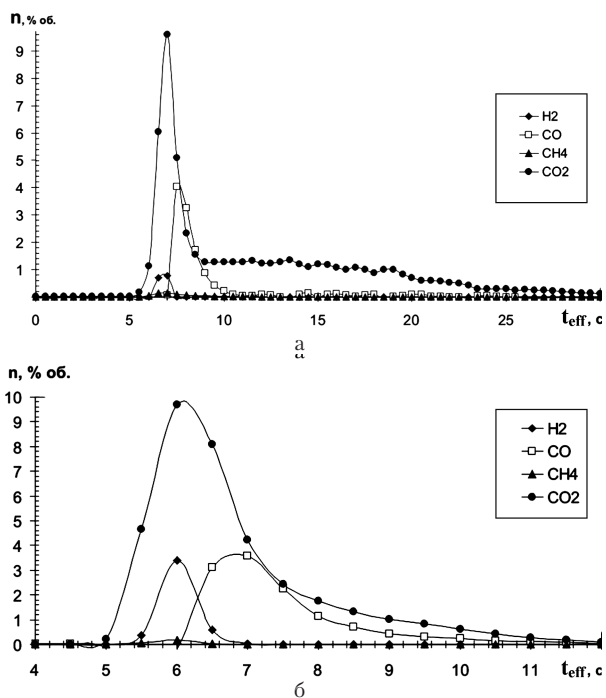


Рис.1. Динамика выхода газообразных компонентов n при сжигании частиц лузги подсолнечника ($m_n = 0,05$ г) при температурах 500 °С (а) и 1000 °С (б).

ует о пониженной скорости реагирования углерода кокса с кислородом воздуха, особенно на завершающих стадиях конверсии коксового остатка лузги. Такой характер выгорания может определять наличие механического недожога лузги из-за несоответствия необходимого времени пребывания ее в аппарате реальному, требующемуся для ее выгорания до заданной степени конверсии.

На основании полученных динамических кривых выхода продуктов пиролиза и выгорания (CO_2 , CO , O_2 , CH_4 , H_2) было оценено полное время выгорания частиц лузги t_{eff}

(рис.2), а также характерное время стадий выгорания летучих и коксового остатка в зависимости от температуры. Для расчета полного времени выгорания получено аппроксимирующее эмпирическое выражение ($r^2 = 0,82$) для температур 500–1000 °С:

$$t_{\text{eff}} = 317299 / T^{1,5146},$$

где T — температура кипящего слоя в реакторе, °С.

Показано, что с увеличением температуры в реакторе происходит уменьшение полного времени выгорания частиц лузги. Установлено, что при термическом разложении лузги основная часть ее массы конвертирует в быстро сгорающие летучие, а оставшаяся часть (до 20–30 % исходной массы) образует твердый коксовый остаток, отличающийся низкой реакционной способностью и высокой прочностью.

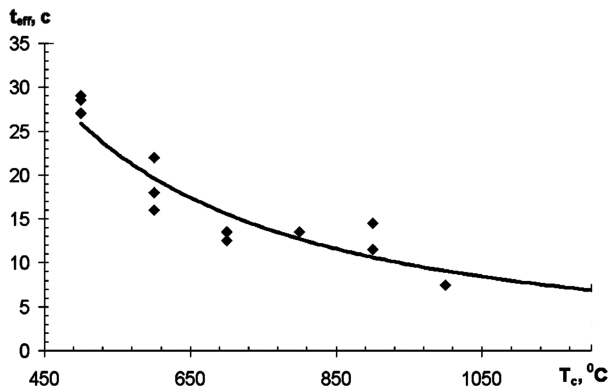


Рис.2. Зависимость времени выгорания частиц лузги подсолнечника t_{eff} от температуры.

Показано, что для всего интервала исследуемых температур (500–1000 °С) наиболее длительная стадия выгорания частиц лузги подсолнечника — это выгорание коксового остатка (около 23–25 с при $t = 500$ °С; 14–18 с при $t = 600$ °С; 8,5–10 с при 700 °С; 10 с при 800 °С; 8 с при 900 °С; 7,5 с при 1000 °С). Для $t > 900$ °С происходит одновременное выгорание летучих и коксового остатка, разделить которое по данным газового анализа затруднительно.

Предполагается, что повышенные значения механического недожога лузги подсолнечника при сжигании в промышленных аппаратах определяются завершающей стадией процесса

Таблица 1. Кинетические характеристики удельной скорости выгорания R_m

Тип угля	Константа скорости реакции K_0' , $\text{с}^{-1}/(\text{кг}/\text{м}^3)^n$	Энергия активации E , кДж/моль
Ensdorf	$1,869 \cdot 10^6$	127
Duiker	$1,708 \cdot 10^6$	128
ТВК	$8,595 \cdot 10^4$	102

— выгоранием коксового остатка и недостаточным учетом влияния на нее технологических параметров процесса.

Определение кинетических характеристик выгорания каменного и бурого углей

Стадия сжигания угля в реакторах под давлением происходит во многих современных энергоустановках. Это процессы газификации и сжигания угля в кипящем (циркулирующем кипящем) слое и потоке под давлением, которые находят применение при освоении чистых угольных энерготехнологий.

Определение кинетических характеристик указанных процессов проведено на установке РСК-1Д с использованием методики, описанной в [1]. Предоставленные для изучения образцы топлива: малозольный каменный уголь Ensdorf ($A^d = 7,42$ %, $V^d = 34,6$ %) и Duiker ($A^d = 12,35$ %, $V^d = 27,6$ %), а также бурый уголь ТВК ($A^d = 5,98$ %, $W^r = 20,19$ %, $V^r = 38,95$ %) угольных месторождений Германии.

Кинетика горения исследовалась для давлений 0,1; 0,8; 1,2 МПа и размеров частиц 0,05–0,063; 0,063–0,10; 0,10–0,16 мм на навесках коксов массой $m = 0,05$ –0,10 г. Обработка опытных данных проводилась для определения удельной (нормированной на текущую массу) скорости выгорания, представленной в следующем виде:

$$R_m = (dm/dt)/m = K_0' \cdot \exp(-E/(R T_p)) C_0^n,$$

где K_0' — константа скорости реакции, $\text{с}^{-1}/(\text{кг}/\text{м}^3)^n$; E — энергия активации, Дж/моль; R — универсальная газовая постоянная, $R = 8,31$ Дж/(моль·К); T_p — температура частицы, К; C_0 — средняя концентрация кислорода воздуха в реакторе, $\text{кг}/\text{м}^3$; n — наблюдаемый порядок реакции по кислороду.

В ходе обработки опытных данных получены кинетические характеристики взаимодействия коксов каменного угля Ensdorf, Duiker ($T = 440$ –645 °С) и бурого угля ТВК (440–635 °С) с кислородом воздуха ($d = 0,10$ –0,16 мм; $n = 0,8$) для давления 1,2 МПа, обобщенные в табл.1.

В рамках экспериментов определено, что указанная температурная область соответствует внутридиффузионному режиму реагирования, а наблюдаемый порядок реакции по кислороду близок к $n \approx 0,8$.

Результаты исследований планировала использовать компания Steinmuller (Германия) для разработки новых образцов энергоустановок, работающих под давлением.

Определение кинетических и динамических характеристик ТПК

На крупных промышленных предприятиях металлургического комплекса в значительных масштабах может производиться энергосодержащее сырье на основе долговывержанного ТПК из угля марки Г. Определение его кинетических и динамических характеристик — первая стадия оценки возможности и эффективности его дальнейшего использования в котлоагрегатах различного типа (с плотным, кипящим, циркулирующим слоем или для пылевидного сжигания).

Работы по определению кинетических характеристик ТПК были выполнены (по заказу Донецксталь-ДМЗ) на дифференциальном импульсном реакторе РСК-1Д [1] в соответствии с усовершенствованной в части определения степени конверсии образца методикой проведения экспериментов, а также на установке по исследованию динамики выгорания угля РСК-2Д [2]. Для сравнения реакционной способности ТПК эксперименты проводились также на углях известных марок: А (антрацит), Т (тощий уголь), Г (газовый уголь), сжигаемых в энергетических котлоагрегатах. Характеристики ТПК (полученного из угля марки Г) и углей марок А, Т, Г представлены в табл.2.

Таблица 2. Технический анализ углей

Марка угля, тип топлива	W _a , %	V _{daf} , %	A _d , %	S _{d,t} , %
А	2,3	2,0	4,39	0,75
Т	1,79	11,1	10,9	1,54
Г	3,32	41,6	6,2	0,46
ТПК	1,87	2,7	11,8	0,74

Эксперименты по определению зависимости скорости взаимодействия коксового остатка ТПК с кислородом воздуха от степени конверсии образца были проведены при T = 560 °C для размеров частиц d = 0,10–0,16 мм (0,40–0,63 мм). Аналогичные сравнительные эксперименты были проведены для коксовых остатков угля А, Т, Г.

Из рис.3 видно, что скорость выгорания ТПК зависит от степени конверсии образца: проходит через максимальное значение ($R_{m0} \cong 4,2 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$) в самом начале кривой конверсии (при X = 6–8 %), а затем монотонно убывает на завершающем этапе выгорания. Видно, что скорость выгорания ТПК при 560 °C на начальном участке конверсии превышает скорость выгорания антрацита. В то же время она снижается по ходу конверсии, падая ниже скорости выгорания газового и тощего угля. Отличительная особен-

ность выгорания ТПК при низких температурах (560 °C) — незначительная степень конверсии образца (около 33–35 %) по сравнению с коксовыми остатками углей А, Т, Г (80–82, около 90 и 92 % соответственно). Последнее, возможно, объясняется существенной дезактивацией активной поверхности ТПК в ходе высокотемпературной (950–1000 °C) термоподготовки исходного угля.

Результаты исследования динамики выгорания навесок ТПК и А, Т, Г в кипящем слое представлены на рис.4. Видно, что наименьшее время выгорания имеет исходный газовый уголь, затем ТПК и тощий уголь, а наибольшее — исходный антрацит. Полученные температурные кривые позволяют судить об уровне максимального тепловыделения при выгорании исследуемых топлив, продолжительности стадий пиролиза и выгорания коксозольного остатка, полного времени выгорания и реакционной способности данных топлив.

На основе полученных данных по кинетике и динамике выгорания А, Т, Г и ТПК в кислороде воздуха при атмосферном давлении были сделаны следующие выводы.

Зависимости скорости выгорания углей А, Т, Г и ТПК в кислороде воздуха имеют экстре-

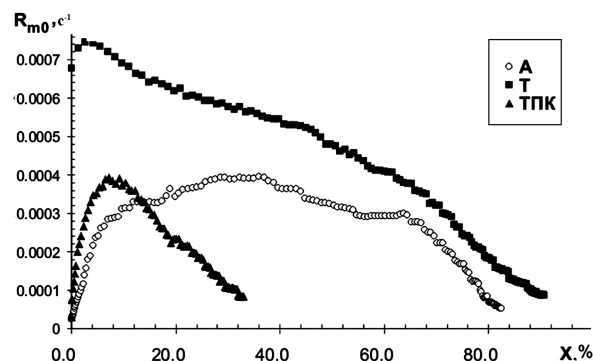


Рис.3. Результаты сравнительного анализа скорости взаимодействия (R_{m0}) исследуемых топлив с кислородом воздуха от степени конверсии (X).

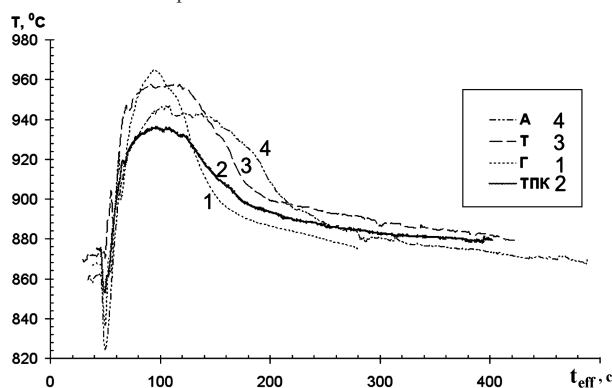


Рис.4. Результаты сравнительного анализа динамики выгорания исследуемых топлив в кислороде воздуха при атмосферном давлении.

мальный характер: повышаются на начальном участке конверсии, проходят через максимум и падают на завершающей стадии конверсии для заданной средней температуры (560 °С).

Скорость выгорания ТПК превышает скорость выгорания коксового остатка антрацита на начальном этапе кривой конверсии, спадая по ходу конверсии до меньших значений, чем у антрацита, тощего и газового угля. Незначительная конверсия ТПК (30–35 %) при 560 °С может объясняться дезактивацией его активной поверхности во время предварительной термообработки.

Выгорание коксового остатка ТПК характеризуется низкой скоростью реагирования с кислородом воздуха для заданной средней температуры (560 °С).

Выгорание топливных частиц в среднетемпературной области (около 560 °С), осуществленное в кинетических экспериментах, проходит во внутридиффузионной области (режим ограничен диффузией в порах), где различие в исходных реакционных свойствах топлива наибольшее и выгорание определяется химической активностью поверхности, пористой структурой вещества и практически не зависит от скорости подвода окислителя.

Увеличение времени выгорания ТПК по сравнению с исходным газовым углем может объясняться дезактивацией его активной поверхности в ходе предварительной высокотемпературной термообработки.

Сжигание топливных частиц в высокотемпературной области (более 850 °С), осуществленное в ходе динамических экспериментов, переводит режим их реагирования в область, близкую к внешедиффузионной, где различие в реакционных свойствах топлива нивелируются и определяются только скоростью подвода окислителя.

Выводы

Представлены сравнительные характеристики топлив различного происхождения (от высокорекреакционных на основе лузги подсолнечника до низкорекреакционных на основе термически подготовленных коксов), позволяющие оценить перспективы их сжигания в традиционных котлоагрегатах и учесть особенности при конструировании новых.

В ходе выгорания высокорекреакционного топлива основная часть его массы конвертирует в быстро сгорающие летучие (высокорекреакционная стадия), а оставшаяся часть (до 20–30 % исходной массы) образует прочный коксовый остаток, отличающийся низкой реакционной способностью.

Во всем интервале исследуемых температур (500–1000 °С) наиболее длительная стадия выгорания частиц лузги подсолнечника — выгорание коксового остатка (около 23–25 с при 500 °С; 14–18 с при 600 °С; 8,5–10 с при 700 °С; 10 с при 800 °С; 8 с при 900 °С; 7,5 с при 1000 °С).

Предполагается, что повышенные значения потерь тепла с механическим недожогом при выгорании лузги подсолнечника в промышленных аппаратах связаны с завершающей стадией процесса — выгоранием низкорекреакционного коксового остатка. Рекомендуется данную стадию процесса проводить в высокотемпературной области температур (более 850–900 °С), где скорость выгорания частиц будет лимитироваться внешедиффузионным торможением.

Скорость выгорания ТПК превышает скорость выгорания коксового остатка антрацита лишь на начальном этапе кривой конверсии, спадая по ходу конверсии до значений меньших, чем у антрацита, тощего и газового углей. Незначительная конверсия ТПК (30–35 %) при 560 °С может объясняться дезактивацией его активной поверхности во время предварительной термообработки.

Низкие размошность и реакционная способность ТПК ограничивают его применение в существующих пылеугольных котлоагрегатах. Более перспективным (после анализа технологических испытаний) представляется его сжигание в плотном или циркулирующем кипящем слое на основе котлов, оснащенных эффективной системой возврата уноса.

Для каменных углей Ensdorf, Duiker и бурого угля ТВК подтверждено, что рост давления в реакторе (от 0,1 до 1,2 МПа) приводит к увеличению скорости взаимодействия их коксового остатка с кислородом воздуха. Полученные новые эмпирические зависимости для скорости выгорания могут быть использованы при проектировании энергоустановок, работающих под давлением.

Список литературы

1. Топал А.И. Взаимодействие коксов энергетических углей с кислородом воздуха под давлением // Экологические технологии и ресурсосбережение. — 2000. — № 4. — С. 7–12.
2. Майстренко А.Ю., Топал А.И. Динамика выгорания частиц твердого топлива в кипящем слое под давлением // Там же. — № 3. — С. 12–16.
3. Карп И.Н., Провалов А.Ю., Пьяных К.Е., Юдин А.С. Исследование динамики выгорания древесных опилок и лузги подсолнечника в кипящем слое // Энерготехнологии и ресурсосбережение. — 2010. — № 3. — С. 9–13.

Поступила в редакцию 12.06.12

Topal A.I.

¹ *Coal Energy Technology Institute, Kiev*

The Experimental Studies of Thermal Conversion Generalized Results of Various Origin Fuels

The experimental studies results of special features of different fuel origin combustion determination: from high reactive ones based on sunflower husk to low reactive ones based on thermally treated delayed coke and the fuels with not yet realized application potential are presented. The basic laws determination of the fuels thermal conversion and also traditional coal is carried out during tests of kinetics and dynamics of samples combustion in air oxygen in wide range of temperatures (400–1000 °C), pressures (0,1–1,2 MPa), particle sizes (0,1–1,6 mm).

Key words: coal, sunflower husk, coke, combustion, conversion degree, activation energy.

Received June 12, 2012

УДК 532.529:517.4

Рохман Б.Б.¹, Матвейчук А.С.²

¹ *Институт угольных энерготехнологий НАН Украины, Киев*

² *Институт возобновляемой энергетики НАН Украины, Киев*

Моделирование и численное исследование процессов термохимической переработки биомассы и углей в топочных устройствах. 2. Зона пневмотранспорта

Построена математическая модель аэродинамики и физико-химических процессов, с помощью которой численно исследовано два способа термохимической переработки бинарных смесей: комбинированное сжигание бурого угля и соломы в реакторах с неподвижным слоем; совместное сжигание угля и биомассы в камерных топках в режиме пневмотранспорта. Определены оптимальные диаметры частиц угля, обеспечивающие минимальный механический недожог, при разных соотношениях расходов компонентов бинарной смеси. Показана возможность организации процесса сжигания антрацитового штыба и соломы в камерных топках с сухим шлакоудалением, что способствует снижению вредных выбросов азота и серы в окружающую среду.

Ключевые слова: горение, газ, топка, надслоевое пространство, биомасса, уголь.

Побудовано математичну модель аеродинаміки та фізико-хімічних процесів, за допомогою якої чисельно досліджено два способи термохімічної переробки бінарних сумішей: комбіноване спалювання бурого вугілля та соломи у реакторах з нерухомим шаром; спільне спалювання вугілля та біомаси у камерних топках у режимі пневмотранспорту. Визначено оптимальні діаметри частинок вугілля, що забезпечують мінімальний механічний недопал, при різних співвідношеннях витрат компонентів бінарної суміші. Показано можливість організації процесу спалювання антрацитового штибу та соломи у камерних топках із сухим шлаковидаленням, що сприяє зниженню шкідливих викидів азоту та сірки у навколишнє середовище.

Ключові слова: горіння, газ, топка, надшаровий простір, біомаса, вугілля.