УДК 662.612

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА НА ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЦЕССА ЕГО ГОРЕНИЯ

Пинчук В.А.

Национальная металлургическая академия Украины, Днепропетровск, Украина

АННОТАЦИЯ

Экспериментально установлены закономерности влияния содержания водной фазы (25...50 %), содержания минеральных примесей (0,5...60 %), размера капель топлива (0,5...5 мм), температуры рабочего пространства печи (550...1000 °С) на процессы воспламенения и горения в воздушной среде одиночной капли водоугольного топлива, полученного из углей различной стадии метаморфизма, что дало возможность создания эмпирических зависимостей для определения продолжительности каждой стадии горения.

ВВЕДЕНИЕ

Анализ известных работ [1-6] показал перспективность развития технологий по сжиганию и газификации водоугольного топлива в Украине, чему препятствует ряд нерешенных проблем при его использовании, а именно: нестабильное воспламенение и неустойчивое горение водоугольного топлива в топках различных конструкций в существующих энергетических и котельных установках; низкая эффективность сжигания водоугольного топлива, полученного из высокозольного и/или низкореакционного угля; нестабильность водоугольного топлива при транспортировке и распыливании. Для эффективного сжигания водоугольного топлива, полученного из украинских углей, и проектирования топочных устройств энергетических и котельных агрегатов, работающих на водоугольном топливе, необходимо детальное исследование закономерностей воспламенения и горения этого топлива. Перспективным путем получения необходимой информации является исследование закономерностей горения одиночной капли топлива, которая может считаться типичной, и позволит определить влияние отдельных факторов на процесс горения. В дальнейшем полученные закономерности могут быть распространены на горение большой совокупности капель.

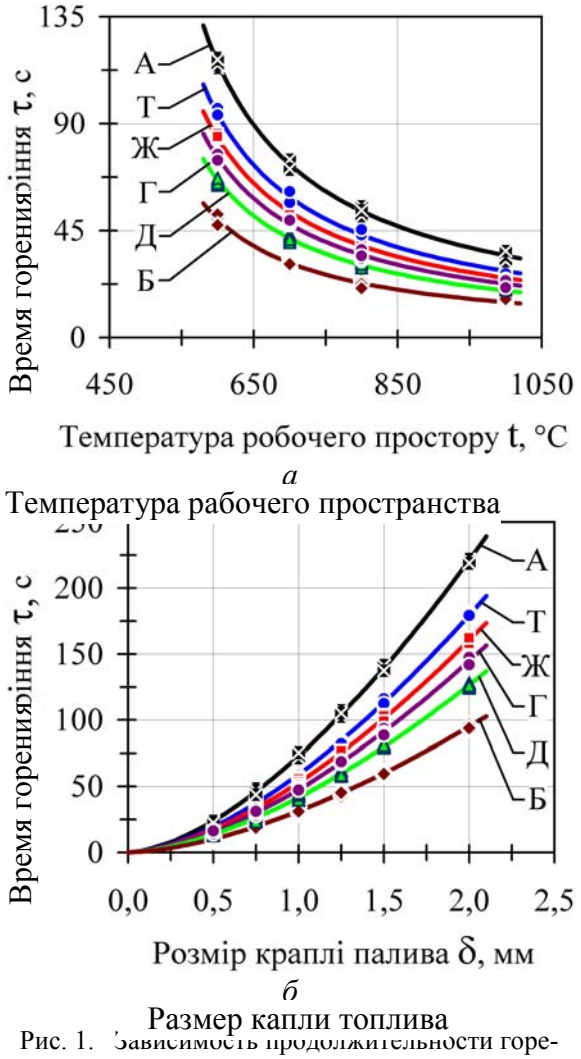
ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для определения закономерностей горения водоугольного топлива использована экспериментальная установка для исследования воспламенения и горения водоугольного топлива, полученного из углей различной стадии метаморфизма с различными характеристиками. Установка состоит из электропечи типа СНОЛ–2.2.1,5/12 с регулирующим прибором РТЭ-4.1М-10-220, необходимым для автоматического контроля и поддержания заданной температуры рабочего пространства печи; устройства для ввода капель водоугольного топлива с системой хромель-алюмелевых термопар; системы регистрирующих приборов для непрерывной регистрации изменения температур в режиме реального времени. Ввод капли в камеру осуществлялся через направляющую трубку. Исследования проводились в воздушной среде при температурах 550…1000 °С. Образец водоугольного топлива помещался в равномерно нагретую высокотемпературную среду. Точность измерения температур составляла ±0,1 °С. Измерения проводились с частотой до 10 $с^{-1}$. Показания термопар передавались на программно-аппаратный измерительный комплекс, который позволял контролировать, обрабатывать и выводить на экран компьютера значения параметров в режиме реального времени. Общая погрешность измерительных приборов составила 2,5...3 %. Доверительный интервал значений временных параметров составляет $\tau \pm 1{,}6$ %, значений температурных параметров $t \pm 2{,}8$ % с доверительной вероятностью 95 %.

Проведены исследования влияния температуры рабочего пространства печи, марки угля, размера угольных частиц, содержания минеральных примесей, соотношения твердой и водной фаз в топливе, размера капель на основные стадии и закономерности горения водоугольного топлива (табл. 1).

Марка угля	Содержание водной фазы, %	Содержание минеральных примесей, %	Размер капли топлива, мм	Температура рабочего пространства печи, °С
Б, Д, Г, Ж, Т, А	25…50	0,5…60	0,5…5	550…1000

Таблица 1. Диапазон изменения параметров при экспериментальных исследованиях горения водоугольного топлива



а

б

Рис. 1. Зависимость продолжительности горения капель водоугольного топлива от температуры рабочего пространства (а) и их размера (б). Б – из угля марки Б, Д - из угля марки Д, Г - из угля марки Г, Ж - из угля марки Ж, Т - из угля марки Т; А - из угля марки А

Установлена зависимость времени горения капель водоугольного топлива из углей разной стадии метаморфизма от температуры рабочего пространства печи (на рис. 1-а приведена при размере капель 1 мм). Видно, что уменьшение времени горения капель топлива с увеличением температуры рабочего пространства печи имеет степенной характер. В идентичных условиях горения капель водоугольного топлива при переходе от антрацита к бурому углю время горения капли значительно уменьшается.

Получены зависимости продолжительности горения в воздушной среде капель водоугольного топлива, полученного из угля различной стадии метаморфизма, от их размера (представлены на рис. 1-б при температуре рабочего пространства 700 °С).

Зависимость времени горения капель водоугольного топлива от их размера имеет степенной характер, увеличиваясь с увеличением размера капли:

$$\tau = k \cdot \delta^{1,6}, \qquad (1)$$

где δ - размер капли водоугольного топлива, мм; k - коэффициент, учитывающий метаморфизм исходного угля и зависящий от температуры рабочего пространства печи, определяемый по формуле, полученной при обработке экспериментальных данных:

$$k = \frac{k_м \cdot 10^3}{t_{р.п.} - 430}, \qquad (2)$$

$k_м$- коэффициент, зависящий от марки угля, из которого приготовлено водоугольного топлива.

Для топлива из угля:

марки Б - $k_м$=8,48; марки Д - $k_м$=11,28;
марки Г - $k_м$=12,89; марки Ж - $k_м$=14,29;
марки Т - $k_м$=15,98; марки А - $k_м$=19,69.

Как видно из полученных данных, в отличие от горения угольных частиц, время горения капель водоугольного топлива в значительной степени зависит от размера капель топлива и в меньшей степени - от температуры рабочего пространства.

Содержание водной фазы в водоугольном топливе может значительно меняться, что влияет на процесс горения. Экспериментальными исследованиями влияния содержания водной фазы в топливе на температурно-временные характеристики горящей капли установлено, что для водоугольного топлива, полученного из углей разной стадии метаморфизма, и при различной температуре рабочего пространства печи оптимальное содержание водной фазы в топливе составляет 36 % и при котором наблюдается рациональное сочетание химических и тепловых процессов, протекающих при горении топлива.

На рис. 2 приведены результаты экспериментальных исследований влияния содержания водной фазы в водоугольном топливе, полученном из углей различной стадии метаморфизма, на время, необходимое для воспламенения, и максимальную температу-

ру капли размером 1 мм при ее выгорании в воздушной среде (сплошные линии – максимальная температура капли при ее выгорании, штриховые линии – время до воспламенения капли; коричневая линия – водоугольное топливо из бурого угля, зеленая линия - водоугольное топливо из длиннопламенного угля, черная линия - водоугольное топливо из антрацита).

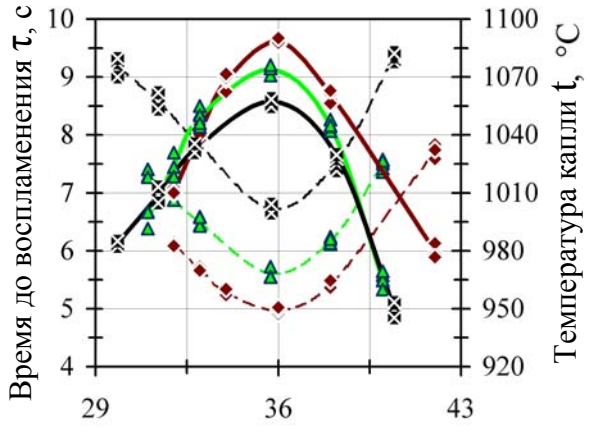


Рис. 2. Влияние содержания водной фазы на параметры горения капли водоугольного топлива в воздушной среде

Увеличение содержания водной фазы в топливе до 36 % приводит к увеличению скорости выделения и более интенсивному газообразованию за счет увеличения пористости топлива и происходящих химических реакций водяного пара с угольным веществом. При содержании водной фазы в водоугольном топливе более 36 % наблюдается избыток водной фазы, в результате чего образуется значительное количество водяного пара, что сопровождается значительными затратами теплоты на испарение, при этом часть водяного пара при этом не взаимодействующего с угольным веществом. Дальнейшее повышение содержания водной фазы в водоугольном топливе выше 42 % приводит к увеличению продолжительности подготовительных стадий процесса горения топлива и ухудшению показателей горения [7].

На примере водоугольного топлива из антрацита на рис. 3 представлены зависимости основных показателей горения топлива от содержания водной фазы при температуре рабочего пространства печи 700 °С.

Как видно из полученных данных при содержании водной фазы 36 % также наблюдается максимальная степень выгорания горючей массы водоугольного топлива. При увеличении содержания водной фазы в топливе с 30 % до 36 % степень выгорания горючей массы увеличивается на 7 %. Зависимости для водоугольного топлива из других марок угля аналогичны представленной выше.

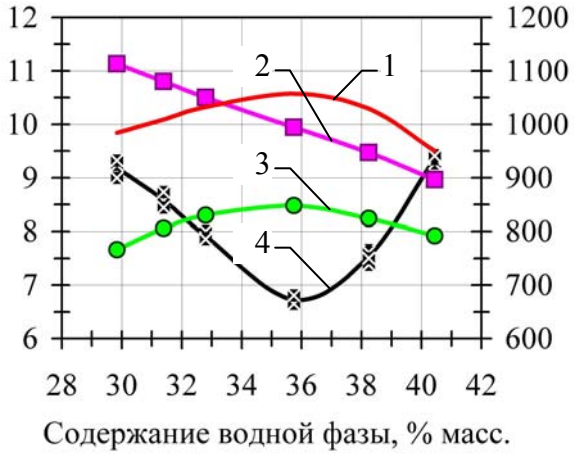


Рис. 3. Зависимость основных показателей горения водоугольного топлива из антрацита от содержания водной фазы при температуре рабочего пространства печи 700 °С: 1-максимальная температура горящей капли топлива диаметром 1 мм, 2-удельная теплота сгорания топлива, 3-степень выгорания топлива χ, 4-время до воспламенения топлива

При проведении исследований влияния содержания минеральных примесей на температурно-временные характеристики горения водоугольного топлива обнаружено, что при разных размерах капель наблюдается различное влияние минеральных примесей на продолжительность горения топлива.

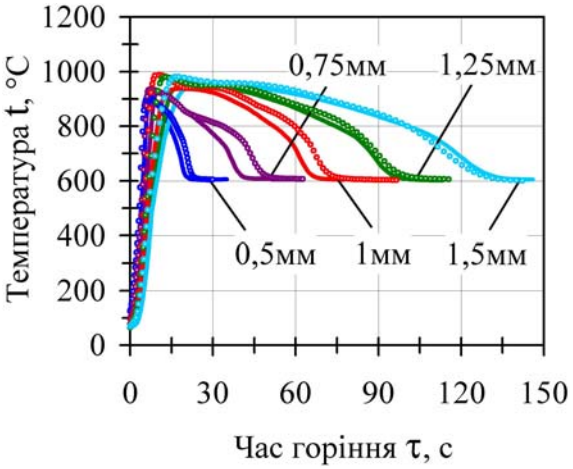


Рис. 4. Темпе характеристики ка топлива с различной зольностью при выгорании в воздушной среде:
———-топливо с зольностью 20,5 %,
·····-топливо с зольностью 8,5 %

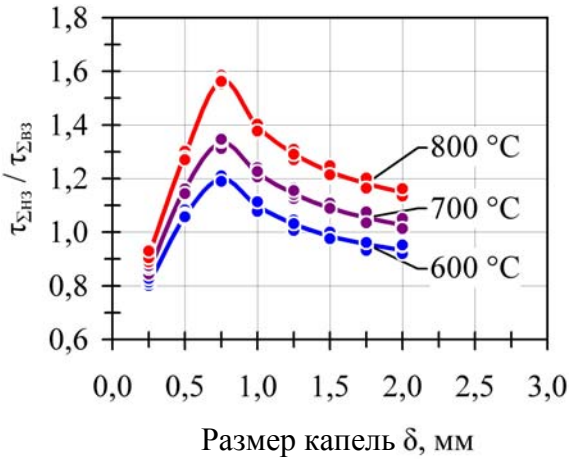


Рис. 5. Изменение отношения времени горения образцов водоугольного топлива с различной зольностью при различном размере капель. $\tau_{\Sigma нз}$ - время горения низкозольного топлива, $\tau_{\Sigma вз}$ -время горения высокозольного топлива

Так, для капель топлива из угля марки Д размером 0,5...1 мм продолжительность горения образца топлива с меньшей зольностью увеличивается по сравнению с образцом топлива с большей зольностью 15...25%, то есть доминирующим фактором является содержание горючей составляющей в единице массы топлива. При размере капель 1,25 мм продолжительность горения образцов с различной зольностью практически одинакова. При размере капель 1,5 мм продолжительность горения образца топлива с меньшим зольностью уменьшается, то есть доминирующим фактором является торможение процесса горения топлива при большей зольности из-за сложности проникновения окислителя в топливо (рис. 4).

Полученные результаты справедливы для топлива из различных марок угля при разной температуре печи, при этом максимум отношение времени горения низкозольных образцов топлива до времени горения высокозольных образцов наблюдается при размере капли топлива 0,75 мм при разной температуре рабочего пространства печи (рис. 5).

По результатам экспериментальных исследований предложены эмпирические зависимости (коэффициент детерминации R^2 составляет 0,95...0,99) для описания каждой стадии горения [8] (нагрев и выход летучих веществ, горение летучих веществ, горение коксового остатка) водоугольного топлива, учитывающие влияние различных параметров.

СТАДИЯ НАГРЕВА ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА И ВЫХОД ЛЕТУЧИХ ВЕЩЕСТВ

Непосредственно время, необходимое для нагрева водоугольного топлива до температуры, при которой начинается активный выход летучих веществ, определяется размерами капель топлива, содержанием в нем минеральных примесей и водной фазы, что обуславливает их теплофизические свойства (теплоемкость, коэффициент теплопроводности), интенсивностью подвода теплоты, температурой воспламенения, которая зависит от стадии метаморфизма исходного угля. В температурном диапазоне рабочего пространства печи 550…1000 °С характер зависимости оказался общим для всех образцов водоугольного топлива из углей разной стадии метаморфизма и может быть обобщен единым эмпирическим уравнением следующего вида:

$$\tau_{н+в.л} = \frac{t_{восп}}{t_{р.п.} - t_{восп}} \cdot \delta^{0,65} \cdot f(W) \cdot f(A), \quad (3)$$

где $t_{р.п}$ - температура рабочего пространства печи, °С;

$t_{восп}$ - температура воспламенения водоугольного топлива, °С;

δ - размер капли водоугольного топлива, мм;

$f(W)$ - функция, учитывающая влияние содержания водной фазы в водоугольном топливе;

$f(A)$ - функция, учитывающая влияние содержания минеральных примесей в водоугольном топливе.

Поскольку содержание водной фазы в топливе оказывает неоднозначное влияние на время до воспламенения летучих веществ (рис. 2), то при определении $f(W)$ используется произведение двух сигмоидальных функций:

$$f(W) = \frac{2,985}{f_1(W) \cdot f_2(W)}, \quad (4)$$

где

$$f_1(W) = 1 + \frac{1}{1 + e^{17,5 - 50 \cdot W}}, \quad (5)$$

$$f_2(W) = 0,71 + \frac{1}{1 + e^{50 \cdot W - 18,9}}, \quad (6)$$

где W – содержание водной фазы в водоугольном топливе, масс. доли.

Функция, учитывающая влияние содержания минеральных примесей в водоугольном топливе $f(A)$ определяется по формуле:

$$f(A) = 1 + 5,506 \cdot (A^c)^2, \quad (7)$$

где A^c - зольность на сухую массу водоугольного топлива, масс. доли.

Как видно на стадии нагрева водоугольного топлива и выхода летучих веществ определяющими являются теплообменные процессы при радиационно-конвективном переносе теплоты, которые в большой степени зависят от содержания водной фазы и минеральных примесей и температурных условий среды.

СТАДИЯ ГОРЕНИЯ ЛЕТУЧИХ ВЕЩЕСТВ

Время горения летучих веществ при сжигании водоугольного топлива отсчитывалось с момента их воспламенения и до полного исчезновения пламени в газовом объеме у поверхности капли топлива. Анализ результатов экспериментальных исследований показал, что длительность стадии горения летучих веществ для образцов водоугольного топлива из углей различных марок зависит от размера капли, содержания минеральных примесей и водной фазы и от выхода летучих веществ, который определяется принадлежностью исходного угля к той или иной стадии метаморфизма, и практически не зависит от температуры рабочего пространства печи. При этом удельный массовый расход летучих веществ при их горении через единицу поверхности капли есть величина постоянная, независящая от размера капли водоугольного топлива.

По результатам обработки и обобщения полученных экспериментальных данных по горению водоугольного топлива получена эмпирическая зависимость для определения продолжительности горения летучих веществ при сжигании топлива из углей различной стадии метаморфизма:

$$\tau_{г.л.} = k_{г.л.} \cdot \delta \cdot V^{daf} \cdot (1 - W^p) \cdot \left(1 - A^c\right) \cdot \rho, \quad (8)$$

где $k_{г.л.}$ - коэффициент, учитывающий метаморфизм исходного угля (поскольку время горения летучих веществ лимитируется сопротивлением коксового остатка, свойства которого зависят от метаморфизма угля) и определяемый опытным путем для каждой марки угля.

Для водоугольного топлива из угля:

марки Б $k_{г.л.}=1{,}60\cdot10^{-2}$,
марки Д $k_{г.л.}=1{,}35\cdot10^{-2}$,
марки Г $k_{г.л.}=1{,}64\cdot10^{-2}$,
марки Ж $k_{г.л.}=1{,}62\cdot10^{-2}$,
марки Т $k_{г.л.}=4.54\cdot10^{-2}$,
марки А $k_{г.л.}=0$;

V^{daf} - выход летучих веществ на сухую беззольную массу, масс. доли;

W^p - влажность водоугольного топлива на рабочую массу, масс. доли;

ρ - плотность водоугольного топлива при 20 °С, кг/м^3.

Плотность водоугольного топлива определяется либо экспериментальным путем, либо по следующей формуле:

$$\rho = \frac{1}{\frac{(1-W)\cdot\left(1-A^c\right)}{\rho_у} + \frac{W}{\rho_в} + \frac{(1-W)\cdot A^c}{\rho_{м.п.}}}, \quad (9)$$

где $\rho_у$ - плотность исходного угля, из которого приготовлено водоугольное топливо при 20 °С, кг/м^3;

$\rho_в$ - плотность воды при 20 °С, кг/м^3;

$\rho_{м.п.}$ - плотность минеральных примесей при 20 °С, кг/м^3 (средняя действительная плотность минеральных примесей углей Украины составляет 2700 кг/м^3).

Как видно продолжительность горения летучих веществ при сжигании водоугольного топлива имеет явно выраженную зависимость и от размера капли, и от содержания летучих веществ в исходном угле, что свидетельствует о том, что скорость этого процесса определяется и физическими параметрами топлива, и кинетикой химических реакций. В отличие от процесса горения летучих веществ при сжигании угля, продолжительность которого зависит, в основном, от размера угольной частицы, что свидетельствует о том, что скорость этого процесса определяется физическими параметрами угля, а не химическими [9].

ГОРЕНИЕ КОКСОВОГО ОСТАТКА

Анализ результатов экспериментальных исследований показал, что продолжительность горения коксового остатка для водоугольного топлива из углей различных марок зависит от температуры рабочего пространства печи, начального размера капли топлива, содержания летучих веществ (как показателя метаморфизма исходного угля), содержания минеральных примесей и водной фазы. При обработке и обобщении полученных экспериментальных данных получена эмпирическая зависимость для определения продолжительности горения коксового остатка при сжигании водоугольного топлива из углей разной стадии метаморфизма:

$$\tau_{к.о.} = k_{к.о.} \cdot \delta_{пр}^{1,6}, \quad (10)$$

где $k_{к.о.}$- коэффициент, учитывающий влияние температуры, который определяется по формуле, полученной при обработке экспериментальных данных:

$$k_{к.о.} = \frac{25 \cdot 10^3}{t_{р.п.} - 430}; \quad (11)$$

$\delta_{пр}$ - приведенный размер капли водоугольного топлива, мм, который определяется по формуле:

$$\delta_{пр} = \delta \cdot \left[\left(1 - V^{daf}\right) \cdot \left(1 - W^{p}\right) \cdot \left(1 - A^{c}\right)\right]^{1/3}. \quad (12)$$

Как видно, время горения коксового остатка прямо пропорционально размеру капли и обратно пропорционально температуре рабочего пространства печи. Время горения коксового остатка тем меньше, чем больше выход летучих веществ в исходном угле, содержание минеральных примесей и водной фазы.

Как показано ранее, при горении водоугольного топлива из разных углей на поверхности капли всегда образуется пористая золовая оболочка, которая не так препятствует диффундированию кислорода как плотная, которая образуется при сжигании многих марок углей. Поэтому, например, при увеличении зольности водоугольного топлива из длиннопламенного угля с 5,5 до 20,5 % топлива длительность горения коксового остатка при сжигании водоугольного топлива увеличивается на 15 %, а не 25….30 %, как характерно для сжигания длиннопламенного угля с аналогичными характеристиками согласно данным [9, 10].

Полученные зависимости для определения продолжительности каждой стадии горения водоугольного топлива справедливы при W^p=25…50 % и A^c=0,5...60 % в температурном диапазоне рабочего пространства печи 550...1000 °С.

Полученные на основе экспериментальных данных эмпирические зависимости горения водоугольного топлива имеют принципиальное значение для построения математических моделей горения топлива в топках энергетических и котельных установок, для расчета тепло и массообменных процессов при термической переработке водоугольного топлива, а также для исследований и расчетов факела, образующегося при горении данного топлива.

ВЫВОДЫ

Исследованиями установлено, что уменьшение суммарного времени горения капель водоугольного топлива с увеличением температуры рабочего пространства печи имеет степенной характер. В идентичных условиях горения капель водоугольного топлива при переходе от антрацита к бурому углю время горения капли значительно уменьшается.

Экспериментально установлены закономерности влияния размера капель топлива на процесс горения и воспламенения водоугольного топлива. Время горения капель водоугольного топлива возрастает с увеличением размера капли по степенной зависимости. В отличие от горения угольных частиц, время горения капель водоугольного топлива в значительной степени зависит размера капель топлива и в меньшей степени - от температуры рабочего пространства.

Для водоугольного топлива, полученного из углей разной стадии метаморфизма, и при различной температуре рабочего пространства печи оптимальное содержание водной фазы в топливе составляет 36 % и при котором наблюдается рациональное сочетание химических и тепловых процессов, протекающих при горении топлива.

При различных размерах капель водоугольного топлива наблюдается разное влияние зольности образцов на суммарную продолжительность горения топлива. Так, для капель топлива из угля марки Д размером 0,5...1 мм продолжительность горения образца топлива с меньшей зольностью увеличивается по сравнению с образцом топлива с большей зольностью 15...25%, то есть доминирующим фактором является содержание горючей составляющей в единице массы топлива. При размере капель 1,25 мм продолжительность горения образцов с различной зольностью практически одинакова. При размере капель 1,5 мм продолжительность горения образца топлива с меньшим зольностью уменьшается, то есть доминирующим фактором является торможение процесса горения топлива при большей зольности из-за сложности проникновения окислителя в топливо. Полученные результаты справедливы для топлива из различных марок угля при разной температуре печи, при этом максимум отношение времени горения низкозольных образцов топлива до времени горения высокозольных образцов наблюдается при размере капли топлива 0,75 мм при разной температуре рабочего пространства печи.

На основе результатов экспериментальных исследований установлены температурно-временные характеристики воспламенения и горения водоугольного топлива, полученного из углей различной стадии метаморфизма, и предложены эмпирические зависимости для описания каждой стадии горения (нагрев и выход летучих веществ, горение летучих веществ, горение коксового остатка), учитывающие влияние различных физических и химических параметров (температура, содержание водной фазы и минеральных примесей, выход летучих веществ, размер капель и проч.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Делягин Г. Н. Жидкое топливо на основе угольных суспензий: возможности и перспективы использования / Г. Н. Делягин, Я. М. Каган, А. С. Кондратьев // Российский химический журнал. - 1994. - № 3. - С. 22 - 27.

   Delyagin G. N. Zhidkoe toplivo na osnove ugolnykh suspenziy: vozmozhnosti i perspektivy ispolzovaniya / G. N. Delyagin, Ya. M. Kagan, A. C. Kondratev // Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal. - 1994. - № 3. - P. 22 - 27.

2. Делягин Г. Н. Водные дисперсионные системы на основе бурых углей как энергетическое и технологическое топливо / Г. Н. Делягин, А. П. Петраков, Г. С. Головин, Е. Г. Горлов // Российский химический журнал. - 1997. - № 6. - С. 72 - 77.

   Delyagin G. N. Vodnye dispersionnye sistemy na osnove burykh ugley kak energeticheskoe i tekhnologicheskoe toplivo / G. N. Delyagin, A. P. Petrakov, G. S. Golovin, E. G. Gorlov // Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal. - 1997. - № 6. - P. 72 - 77.

3. Мурко В. И. Научные основы процессов получения и эффективного применения водоугольных суспензий : автореф. дис. на соискание научн. степени д-ра техн. наук : спец. 05.17.07 - химическая технология топлива и топливно-смазочных материалов" / В. И. Мурко. - Москва, 1999. - 48 с.

   Murko V. I. Nauchnye osnovy protsessov polucheniya i effektivnogo primeneniya vodougolnykh suspenziy : avtoref. dis. na soiskanie nauchn. stepeni d-ra tekhn. nauk : spets. 05.17.07 - khimicheskaya tekhnologiya topliva i toplivno-smazochnykh materialov" / V. I. Murko. - Moskva, 1999. - 48 p.

4. Ходаков Г. С. Водоугольные суспензии в энергетике / Г. С. Ходаков // Теплоэнергетика. - 2007. - № 1. - С. 35 - 45.

   Khodakov G. S. Vodougolnye suspenzii v energetike / G. S. Khodakov // Teploenergetika. - 2007. - № 1. - P. 35 - 45.

5. Мальцев Л. И. Сжигание каменного угля в виде водоугольной суспензии в котлах малой мощности / Л. И. Мальцев, И. В. Кравченко, С. И. Лазарев, Д. А. Лапин // Теплоэнергетика. - 2014. - № 7. - С. 25 - 30.

   Maltsev L. I. Szhiganie kamennogo uglya v vide vodougolnoy suspenzii v kotlakh maloy moshchnosti / L. I. Maltsev, I. V. Kravchenko, S. I. Lazarev, D. A. Lapin // Teploenergetika. - 2014. - № 7. - P. 25 - 30.

6. Долинский А. А. Водоугольное топливо: перспективы использования в теплоэнергетике и жилищно-коммунальном секторе / А. А. Долинский, А. А. Халатов // Промышленная теплотехника. - 2007. - Т. 29. - № 5. - С. 70 - 79.

   Dolinskiy A. A. Vodougolnoe toplivo: perspektivy ispolzovaniya v teploenergetike i zhilishchno-kommunalnom sektore / A. A. Dolinskiy, A. A. Khalatov // Promyshlennaya teplotekhnika. - 2007. - T. 29. - № 5. - P. 70 - 79.

7. Делягин Г. Н. Экспериментальное исследование процесса горения капли волоугольной суспензии из бурого и газового углей / Г. Н. Делягин, А. И. Кулинич, В. И. Кирсанов // Горение дисперсных топливных систем: Сб. науч. тр. - М. : Наука. - 1965. - С. 55 - 67.

   Delyagin G. N. Eksperimentalnoe issledovanie protsessa goreniya kapli volougolnoy suspenzii iz burogo i gazovogo ugley / G. N. Delyagin, A. I. Kulinich, V. I. Kirsanov // Gorenie dispersnykh toplivnykh sistem: Sb. nauch. tr. - M. : Nauka. - 1965. - P. 55 - 67.

8. Пинчук В. А. Экспериментальные исследования закономерностей воспламенения и горения водоугольного топлива, полученного из углей различной стадии метаморфизма / В. А. Пинчук // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. - 2014. - Вып. 1(14) - Днепропетровск : "НПВК Триакон", 2014. - С. 159 - 164.

   Pinchuk V. A. Eksperimentalnye issledovaniya zakonomernostey vosplameneniya i goreniya vodougolnogo topliva, poluchennogo iz ugley razlichnoy stadii metamorfizma / V. A. Pinchuk // Sovremennaya nauka: issledovaniya, idei, rezultaty, tekhnologii. - 2014. - Vyp. 1(14) - Dnepropetrovsk : "NPVK Triakon", 2014. - P. 159 - 164.

9. Бабий В. И. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела / В. И. Бабий, Б. Ф. Куваев. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 208 с.

   Babiy V. I. Gorenie ugolnoy pyli i raschet pyleugolnogo fakela / V. I. Babiy, B. F. Kuvaev. - M.: Energoatomizdat, 1986. - 208 p.

10. Основы практической теории горения / [Померанцев В. В., Арефьев К. М., Ахмедов Д. Б. и др.]; под ред. В. В. Померанцева [2-е изд., перераб. и доп.]. - Л. : Энергоатомиздат, 1986. - 312 с.

    Osnovy prakticheskoy teorii goreniya / [Pomerantsev V. V., Arefev K. M., Akhmedov D. B. i dr.]; pod red. V. V. Pomerantseva [2-e izd., pererab. i dop.]. - L. : Energoatomizdat, 1986. - 312 p.