

УДК. 536.4, 622.6

**Черненко А.С.**

*Одесский национальный университет имени И.И. Мечникова  
E-mail: chernalex@ukr.net*

### **Зажигание и горение частиц древесного угля в азотно-кислородных смесях комнатной температуры. Часть I. Экспериментальные исследования в воздухе.**

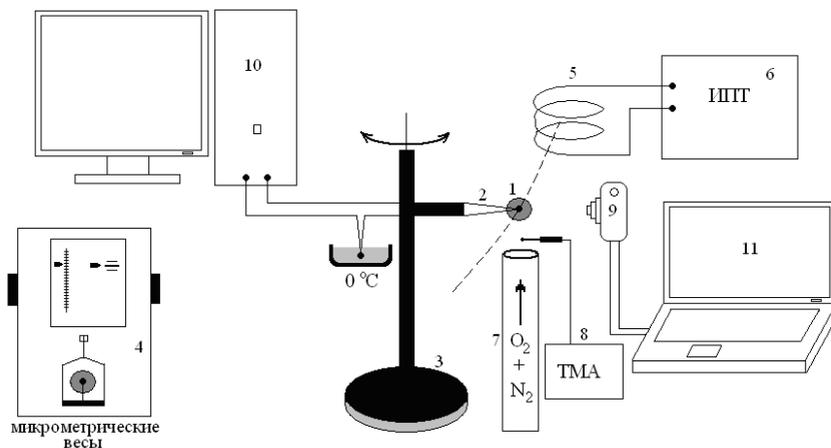
Изучается зажигание и дальнейшее горение крупных частиц древесного угля в воздухе комнатной температуры. Показано влияние зольного слоя, начального диаметра частицы и скорости обдува холодным воздухом на динамику изменения температуры, диаметра и плотности частицы при ее горении.

**Введение.** В настоящее время продолжают работы по исследованию механизмов высокотемпературного теплообмена (ТМО) и химических реакций пористых частиц электродного угля, графита и коксов природного угля с газами [1-3]. Интерес к горению угольной пыли возрастает и в связи с ее использованием в металлургии в качестве пылеугольного топлива [4]. Важным заданием теоретического исследования является изучение характеристик зажигания и горения пористых углеродных частиц при разных начальных температурах и диаметрах. Поскольку разные марки угля отличаются по свойствам, то для полного его сгорания нужно выбирать оптимальный режим горения. Угли разных марок имеют разные свойства. Очевидно, что при их сжигании эти особенности будут обязательно проявляться и их необходимо знать и учитывать при подборе топлива и выборе режимов сжигания [5].

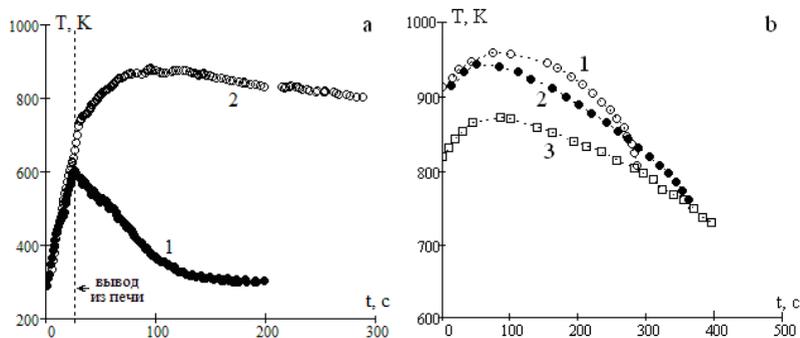
Древесный уголь является одним из видов биотоплива. Широкое применение древесного угля обусловлено основными свойствами – высокой пористостью, огромной теплотой сгорания и неспособностью к самовоспламенению в воздухе. При горении древесного угля отсутствуют вредные выбросы в атмосферу, нет угарного газа. После сгорания древесного угля остается совсем мало золы (2.5-3.5%).

Цель данной работы – исследование закономерностей временных зависимостей температуры, диаметра и плотности пористой углеродной частицы (на примере частицы древесного угля) при ее зажигании в азотно-кислородных смесях комнатной температуры.

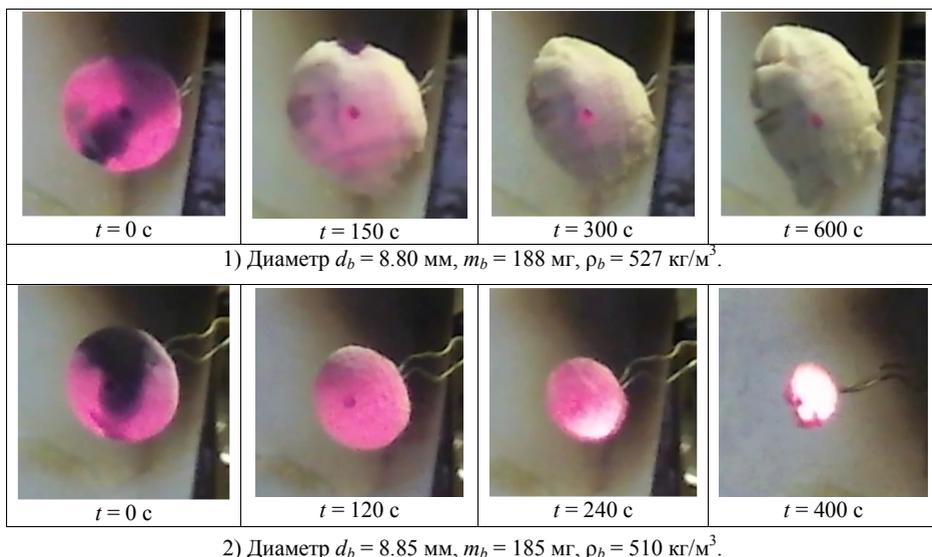
**Экспериментальная установка.** Для исследования процессов зажигания и горения частиц древесного угля в азотно-кислородных смесях была собрана экспериментальная установка (рис. 1). Частица древесного угля с диаметром от 7 до 15 мм располагалась на дифференциальной хромель-алюмелевой термопаре диаметром рабочего спая 1 мм. Сигнал от нее передавался на персональный компьютер, где и фиксировалась временная зависимость температуры частицы.



**Рис. 1.** Экспериментальная установка: 1 – частица, 2 – термопара ХА, 3 – штатив, 4 – микрометрические весы, 5 – накаливаемая спираль, 6 – источник постоянного тока, 7 – трубка для подачи азотно-кислородной смеси, 8 – термоанемометр, 9 – веб-камера, 10, 11 – компьютеры.



**Рис. 2.** Временные зависимости температуры частицы древесного угля в воздухе (293 К).  
 а) при различных начальных температурах  $d_b = 9.92$  мм,  $m_b = 166$  мг,  $\rho_b = 325$  кг/м<sup>3</sup>.  
 б) при различных начальных размерах частицы: 1)  $d_b = 7.8$  мм,  $m_b = 120$  мг,  $\rho_b = 483$  кг/м<sup>3</sup>;  
 2)  $d_b = 10.9$  мм,  $m_b = 318$  мг,  $\rho_b = 470$  кг/м<sup>3</sup>; 3)  $d_b = 13.2$  мм,  $m_b = 561$  мг,  $\rho_b = 466$  кг/м<sup>3</sup>.

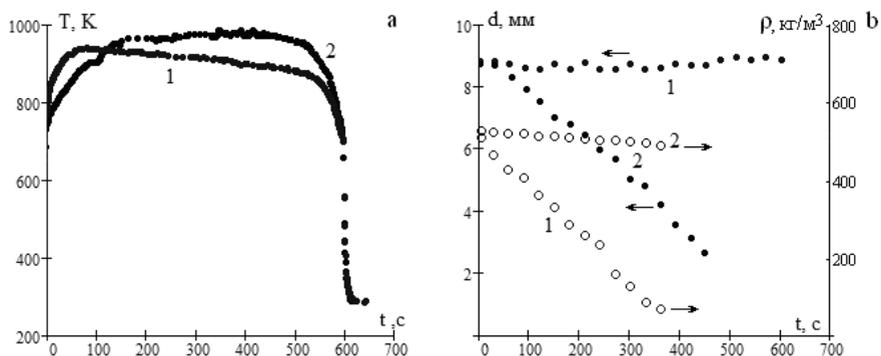


**Рис. 3** Кинограмма горения частиц древесного угля 1) со слоем золы и 2) без него (с резким сдвиганием слоя золы).

Для зажигания частица с помощью подвижного штатива вводилась внутрь нагретой до высокой температуры спирали. При нагревании частицы до необходимой начальной температуры она вводилась в поток азотно-кислородной смеси комнатной температуры, где и проводилось наблюдение за ней дополнительно с помощью веб-камеры. Изменение диаметра фиксировалось методом цифровой обработки фотографий в разные моменты времени. На рис. 2а представлены временные зависимости температуры частицы при ее зажигании (кривая 2) и его отсутствии (кривая 1). Из рис.2а следует, что критическая температура зажигания данной частицы лежит в интервале 600-650 К. Температура горения (тления) частицы древесного угля зависит от начального диаметра (рис. 2б): частица большего размера имеет меньшую температуру горения, что вообще не противоречит теоретическим результатам [1]. Скорость изменения температуры горения больше для частицы с меньшим диаметром.

Температура частицы при горении монотонно понижается после довольно быстрого достижения максимального значения. Причина кроется в образовании на поверхности частицы слоя золы белого цвета (коэффициент черноты мал). Со временем твердое ядро частицы уменьшается, оставляя пористую прослойку при практически неизменном внешнем размере частицы. Яркость частицы и теплотопотери излучением уменьшаются. Таким образом, на начальном этапе, когда слоя золы нет, температура частицы повышается (рис.2б).

Зольность угля составила около 1 %: при сжигании частицы с начальной массой 188 мг масса золы, которая осталась после ее сгорания, составила около 2 мг.



**Рис.4** Влияние поверхностного зольного слоя на температуру горения частицы древесного угля:

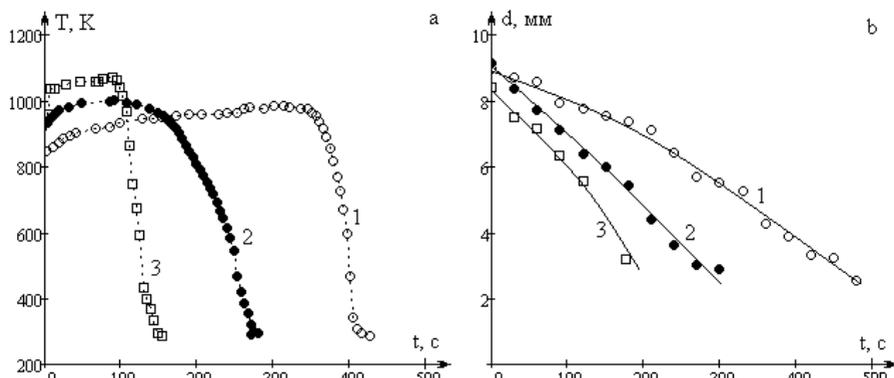
1. Диаметр  $d_b = 8.80$  мм,  $m_b = 188$  мг,  $\rho_b = 527$   $\text{кг/м}^3$  (со слоем золы).
2. Диаметр  $d_b = 8.85$  мм,  $m_b = 185$  мг,  $\rho_b = 510$   $\text{кг/м}^3$  (без слоя золы).

Для выяснения роли золы в процессе горения частицы произведено исследование зажигания и последующего горения двух практически одинаковых частиц древесного угля (рис.3). Обе частицы после зажигания выводились в воздух комнатной температуры. С одной частицы периодически кратковременным резким потоком воздуха сдувался слой золы. Отметим некоторые качественные закономерности.

1. В отсутствие зольного слоя температура частицы монотонно повышается при уменьшении размера частицы в процессе горения, что согласуется с результатами [1]. Срыв слоя золы (увеличение коэффициента черноты) привел к повышению температуры частицы (рис. 4). Диаметр частицы монотонно уменьшается при несущественном уменьшении плотности частицы. Выгорание частицы происходит на поверхности частицы.
2. Внешний диаметр частицы со слоем золы слабо меняется. Выгорание происходит под шубой внутри двухслойной частицы. При этом видимая плотность частицы уменьшается в процессе выгорания практически до нуля. Частица в конце горения фактически состоит из пористого остатка хрупкой структуры.

Слой золы, который образуется, обычно (без обдува) неравномерно распределен по поверхности частицы. Частица принимает эллипсоидальную форму. При определении размера частицы измерялся меньший из диаметров эллипсоида. Например, для частицы (табл. 2, частица 1) отношение диаметров: 8.80/11.85 мм.

Для определения изменения диаметра и плотности частицы древесного угля в процессе горения частица закреплялась на микрометрических весах (рис. 1), где и осуществлялась ее съемка. Изменение плотности частицы определялось из временной зависимости изменения массы частицы. Полученная плотность частицы является эффективной (средней) плотностью частицы.



**Рис. 5** Влияние скорости обдува частицы на горение частицы древесного угля в воздухе комнатной температуры.

- 1) Диаметр  $d_b = 8.95$  мм,  $m_b = 197$  мг,  $\rho_b = 525$  кг/м<sup>3</sup>,  $U = 0$  м/с с периодическим сдуванием золы.
- 2) Диаметр  $d_b = 9.15$  мм,  $m_b = 215$  мг,  $\rho_b = 536$  кг/м<sup>3</sup>,  $U = 1$  м/с.
- 3) Диаметр  $d_b = 8.50$  мм,  $m_b = 180$  мг,  $\rho_b = 560$  кг/м<sup>3</sup>,  $U = 3$  м/с.

На рис. 5. представлены зависимости температуры и диаметра частицы при различных скоростях обдува. В случае  $U = 0$  м/с слой золы снимался, как и ранее, периодически резким кратковременным потоком воздуха. Видно, что с увеличением скорости обдува увеличивается температура частицы, вследствие чего уменьшается и время горения. Причиной случит повышение скорости тепловыделения за счет возрастания массопереноса кислорода к единице поверхности более сильно, чем возрастание теплообмена с газом за счет существенной доли теплового излучения в общих теплотерях. Это подтверждают теоретические оценки.

Вознесенский Н.П. и Чернышев А.Б. в результате исследования пограничного слоя у поверхности частицы древесного угля, антрацита и малозольного электродного угля при их горении установили существование «застойного» пограничного газового слоя. Его толщина зависит от вида топлива, от содержания и свойств золы, а также от скорости газового потока. Для исследованных видов твердого топлива с увеличением скорости газового потока (от 3 до 8 м/с) толщина пористого золного слоя несколько уменьшалась до 0.2-0.3 мм.

Механизм переноса вещества при горении натурального золного твердого топлива и определяется структурой пограничного слоя. Наличие «застойного» газового слоя дает основание полагать, что скорость горения частицы твердого топлива определяется в основном скоростью диффузионного переноса вещества в этом «застойном» слое.

**Выводы.** Наличие золного поверхностного слоя определяет динамику изменения температуры, диаметра и плотности пористой золной частицы. Наличие золного поверхностного пограничного слоя уменьшает теплообмен из-

лучением частицы древесного угля с окружающими телами. Падение температуры частицы определяется скоростью диффузии кислорода через поверхностный слой. Сдувание этого слоя в результате обтекания потоком газа способствует повышению температуры частицы в процессе выгорания частицы. Причиной случит повышение скорости тепловыделения за счет возрастания массопереноса кислорода к единице поверхности в суммарном тепловом балансе более сильно, чем возрастание теплообмена с газом за счет существенной доли теплового излучения в общих теплопотерях.

Выражаю благодарность проф. Калинчаку В.В. за оказанную помощь и консультации.

### Литература:

1. *Калинчак В.В., Черненко А.С.* Горение и самопроизвольное погасание пористых углеродных частиц в азотно-кислородных смесях комнатной температуры // Физика горения и взрыва. – 2013. – Т. 49, №2. – С. 80-88.
2. *Хаджинов Е.А.* Экспериментальное исследование кинетики горения одиночных частиц пылеугольного топлива // Металл и литье Украины. – 2013. – № 11. – С. 9-13.
3. *Гремячкин В.М.* Горение пористых частиц углерода в воздухе // Физика горения и взрыва. – 2011. – Т. 47, №5. – С. 18-23.
4. *Бойко В.С., Матвиенков С.А., Ярошевский С.Л., Кузин А.В., Климанчук В.В., Струтинский В.А.* Расчет и оценка эффективности технологии доменной плавки с применением пылеугольного топлива в условиях ПАО «ММК им. Ильича» // Металл и литье. – 2012. – № 2-3.
5. Основы практической теории горения / под. ред. В. В. Померанцева. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отд-ние, 1986. – 312 с.

### *Черненко О.С.*

#### **Запалювання і горіння частинок деревного вугілля в азотно-кисневих сумішах кімнатної температури. Частина I. Експериментальні дослідження в повітрі.**

*Вивчено запалювання і подальше горіння великих частинок деревного вугілля в повітря кімнатної температури. Показано вплив зольного прошарку, початкового діаметру частинки і швидкості обдува холодним повітрям на динаміку зміни температури, діаметру і густини частинки при її горінні.*

### *Chernenko A.S.*

#### **Ignition and combustion of charcoal particles are in the nitrogen-oxygen mixtures at room temperature. Part I. Experimental studies in the air.**

*Ignition and combustion of large charcoal particles studied in air at room temperature. It shows the influence of the ash layer, initial particle diameter and velocity cold air on the dynamics of changes of temperature, density and diameter particle during its combustion.*