УДК 536.46: 622.612

ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУР ВНУТРИ УГЛЕРОДНЫХ ЧАСТИЦ НА ИХ ВОСПЛАМЕНЕНИЕ И ГОРЕНИЕ

Калинчак В.В., Орловская С.Г., Рябчук Л.И., Зуй О.Н.

Одесский национальный университет им. И.И. Мечникова, Одесса, Украина

АННОТАЦИЯ

В работе приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований динамики окисления, воспламенения и горения углеродных частиц в горячей газообразной среде. Изучено влияние неоднородности поля температур по частице на характеристики высокотемпературного окисления. Численным решением нестационарных дифференциальных уравнений теплопроводности установлено, что не учет распространения тепла вглубь углеродного массива приводит к завышенным значениям характеристик высокотемпературного тепломассообмена. В результате экспериментальных исследований доказано явление потухания окислившейся до критического диаметра частицы, которому предшествует заметное повышение ее температуры, что согласуется с расчетом по теоретической модели.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы усилился интерес к вопросам повышения эффективности использования твердого природного органического топлива в качестве сырья для обеспечения энергией различных областей промышленности с одновременным снижением вредных выбросов.

В специальной литературе изучалось горение частиц топлива в различных средах с учетом влияния стефановского течения и потерь излучением, естественной и вынужденной конвекции на характеристики горения [1 - 8]. Во всех этих случаях при изучении динамики поведения твердой фазы в газообразной среде делалось предположение, что частица угля обладает бесконечной теплопроводностью. Попадая в камеру сгорания, она мгновенно прогревается на всю глубину до температуры ее поверхности. Так же в работах не проведен анализ возможности применения такого предположения для широкого диапазона температур и размеров частиц.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ

В настоящей работе приведены результаты экспериментального и теоретического изучения влияния распространения тепла в глубь углеродного массива на характеристики воспламенения, горения и потухания частиц.

Частица углерода вносилась в печь на термопаре. Температуры поверхности и центра частицы контролировались хромель-алюмелевыми термопарами. Нагрев печи осуществлялся подачей напряжения от автотрансформатора. Температура воздуха в печи контролировалась аналогичной термопарой. Изменение температуры на поверхности и в центре частицы регистрировалось аналого-цифровым преобразователем, сигналы подавались на персональный компьютер, где проводилась обработка данных и расчет временных производных температур $\frac{\partial T}{\partial t}$. Температура частиц углерода при высокотемпературном окислении параллельно измерялась яркостным пирометром. Одновременно происходила киносъемка частицы цифровой камерой Canon.

Экспериментальные исследования проводились со сферическими частицами электродного угля с начальными диаметрами d_b =4÷10 мм. Перед началом опыта производилось взвешивание частиц, а затем определялась их плотность. В основном в опытах использовались частицы углерода с плотностью ρ =1700 кг/м^3.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис.1 представлены экспериментальные временные зависимости температуры, скорости ее изменения и диаметра частицы углерода, окисляющейся в нагретом до температуры газа воздухе T_g=1143 К.

На полученных экспериментальных зависимостях температур поверхности и центра частиц, а также скоростей их изменения отчетливо просле-

живаются все фазы процесса нагрева частицы в окислительной среде:

1) инертный прогрев – участок кривых до точки I', в конечной точке которого $\left.\frac{\partial T}{\partial t}\right|_{I'}$ - минимально;
2) этап химического прогрева – участок $I'I$, в течение которого растут теплопритоки самоускоряющихся химических реакций и частица прогревается за счет этого тепла до температуры, превышающей температуру газа. В конце этой стадии частица воспламеняется, $\left.\frac{\partial T}{\partial t}\right|_{I}$ - максимально;
3) стадия квазистационарного высокотемпературного режима – участок кривых после точки I.

На стадиях прогрева диаметр частицы изменяется слабо, а температура поверхности частицы превышает температуру ее центра. Однако, к середине этапа инертного прогрева, скорость роста температуры центра превышает скорость роста температуры ее поверхности. Поведение кривой $\frac{\partial T}{\partial t}$ для центра частицы аналогично поведению кривой для ее поверхности с запаздыванием на 10 секунд. К началу стадии высокотемпературного режима, температуры поверхности и центра сравниваются, и в дальнейшем на всем этапе высокотемпературного окисления температура центра частицы превышает температуру ее поверхности. На стадии высокотемпературного окисления диаметр частицы интенсивно уменьшается.

Действительная температура поверхности частицы, рассчитанная по показаниям яркостного пирометра, хорошо совпадает с температурой, измеренной термопарой (рис.1, а, б).

Временная зависимость скорости изменения температуры поверхности частицы на высокотемпературной стадии испытывает колебания (рис.1, в), возникающие в результате конвективных тепловых потоков.

На рис.2 представлены результаты сравнения временных зависимостей температур (а), диаметра частицы (б), скоростей изменения температур (в), полученные экспериментально и рассчитанные по физико-математической модели.

Зависимости $\frac{\partial T}{\partial t}(t)$ для центра частицы, как экспериментальная, так и расчетная, характеризуют увеличение скорости нарастания температуры в частице после момента ввода в высокотемпературную печь, а затем ее уменьшение практически до нуля в режиме высокотемпературного окисления (рис.2,в). Температура центра частицы, измеренная термопарой (кривая 1), хорошо совпадает с действительной температурой частицы, измеренной при помощи яркостного пирометра.

В ходе эксперимента на этапе высокотемпературного окисления при уменьшении диаметра частиц не удавалось их удержать на термопаре и они падали на кварцевую подложку. После падения на подложку происходила киносъемка горящих частиц цифровым аппаратом (рис.2, г), что позволило определить яркость их свечения и изменение диаметра.

Из анализа временной зависимости диаметра частицы (рис.2,б) следует хорошее согласие расчётных и экспериментальных данных. Цифровая съемка частицы в процессе высокотемпературного окисления позволила проследить динамику изменения её диаметра (рис.2,г) до момента потухания. После исчезновения свечения частицы (её потухания), кварцевая подложка, на которой окислялась частица, изымалась из печи и исследовалась под микроскопом. На подложке была обнаружена затухшая частица неправильной формы (рис.2, д), которая являлась несгоревшим остатком углеродной частицы. Было проведено сравнение размера несгоревшего остатка с размером частицы, рассчитанным теоретически.

Эффективный диаметр несгоревшей частицы определялся в предположении ее сферичности. Ее площадь определялась на основе компьютерной программы. Сравнения показали, что диаметр затухшей частицы, изучавшейся экспериментально (d_E =150 мкм), превышает ее размер, полученный теоретически (d_E =35 мкм). Различие диаметров потухания можно объяснить не учетом в физико-математической модели зольности частицы, теплоотвода от частицы к подложке и колебаниями температуры газовой фазы в результате естественной конвекции.

В экспериментах, проведенных с частицами меньшего размера, также наблюдалось хорошее согласие температуры центра частицы, измеренной термопарой и пирометром. Расчетные зависимости температур центра и поверхности расположены несколько ниже экспериментальных, что может быть объяснено химическим тепловыделением в порах частицы, которое не учитывалось в физико-математической модели.

На рис.3 представлены временные зависимости яркости свечения горящих частиц (а, в) и температур их поверхности (б, г) для частиц с различным начальным диаметром. Температура рассчитывалась по физико-математической модели на временном интервале после падения частицы с термопары и до момента её потухания. По яркости можно определить качественный ход температуры частицы. Как в расчете, так и в эксперименте, наблюдается резкое увеличение температуры углеродной частицы, которая достигает максимального значения перед моментом потухания (рис.2 б, г). В экспериментальном плане поведение температуры частицы перед потуханием практически не изучено.

В ходе исследований было проведено сравнение результатов расчета характеристик воспламенения, горения и потухания по двум физико-

математическим моделям: с учетом распределения температуры по диаметру частицы и без учета, в предположении мгновенного прогрева частицы по ее глубине.

На рис.4 представлены результаты расчетов по этим моделям для времен индукции (t_{ind}), горения (t_{bur}), максимальной температуры горения ($T_{\max}$) и критического диаметра потухания (d_E). Анализ графиков показывает, что не учет распространения тепла вглубь углеродного массива (кривые 2) приводит к завышенным значениям для характеристик высокотемпературного тепломассообмена: для периода индукции ~ 50%, для времени горения от 7% (для мелких частиц) до 17% (для частиц ~ 1 мм). Температура горения, рассчитанная по точной модели, в среднем, на 100 градусов ниже для всего диапазона начальных диаметров, а критический диаметр, характеризующий потухание, снижается приблизительно на 5 мкм.

ВЫВОДЫ

Таким образом, в результате проведенных опытов выяснено, что в процессе нагрева и потухания частицы температуры поверхности и ее центра неодинаковы. При потухании разность этих температур больше, чем при переходе к высокотемпературному окислению.

Установлено, что неучет перепада температур по глубине частицы приводит к искажению результатов математического моделирования задачи, особенно на стадии инертного прогрева и эффективного химического выделения энергии.

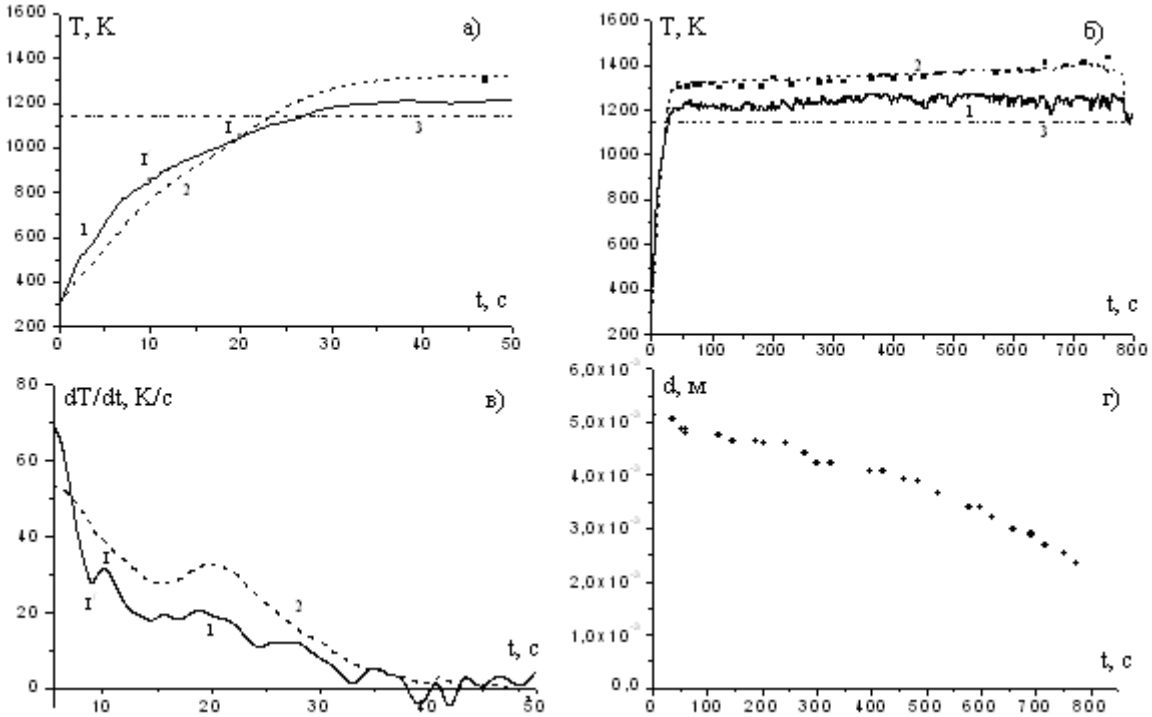

Рис.1 Экспериментальные временные зависимости: а) и в) – на начальном этапе прогрева; а) - температуры поверхности (1) и центра (2) углеродной частицы, температура газа (3); в) - временной производной температуры поверхности (1) и центра (2) частицы углерода; б) и г) - во время всего эксперимента: б) - температуры поверхности (1) и центра (2) частицы, температуры газа (3); г) - диаметра частицы; ■ – температура, измеренная яркостным пирометром.

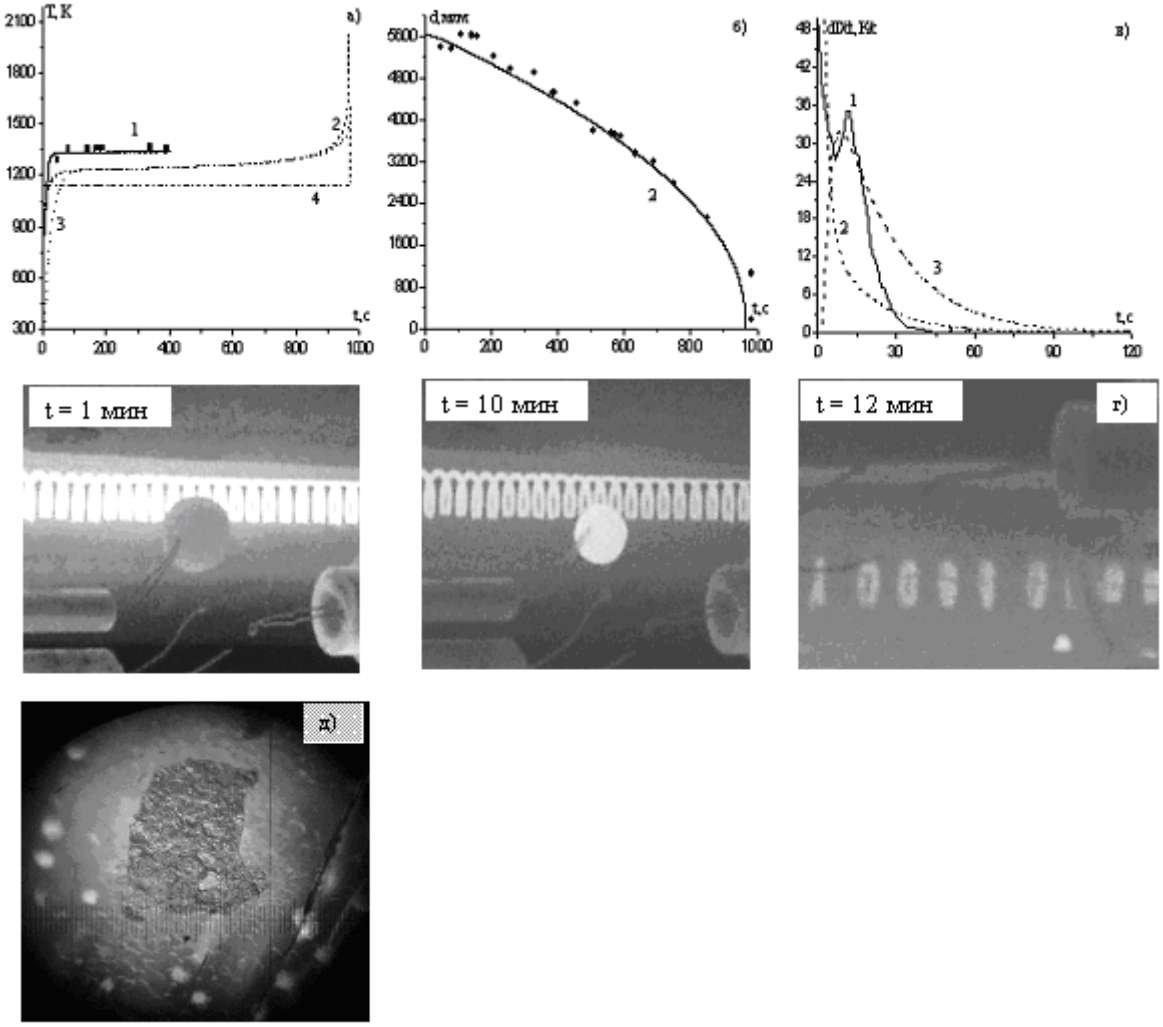

Рис.2 Зависимости температуры (а), диаметра (б), скорости изменения температуры (в) углеродной частицы с ρ =1700 кг/м^3, d_b = 5,6 мм от времени. T_g = 1145 К. 1- эксперимент (центр), 2, 3 - расчет (2 - поверхность, 3 - центр), 4 - температура газа, ■ - температура, измеренная при помощи яркостного пирометра, ● – эксперимент $d(t)$, (г) - кинограмма горящей частицы углерода на термопаре и на подложке; (д) - фотография под микроскопом затухшей частицы углерода.

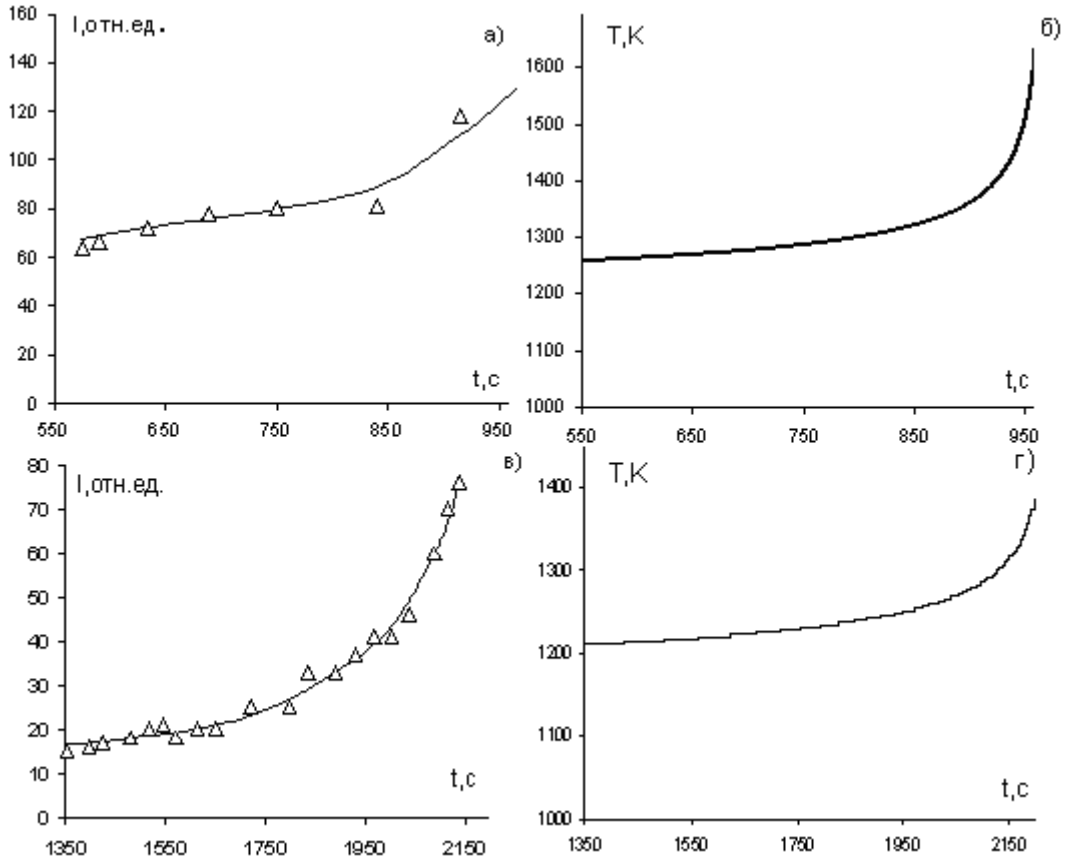

Рис.3 Временные зависимости яркости излучения (I) углеродной частицы и расчётной температуры ее поверхности (T) для а, б) - d_b = 5.6 мм, T_g =1145K; в, г) - d_b = 8.2 мм, T_g =1130K.

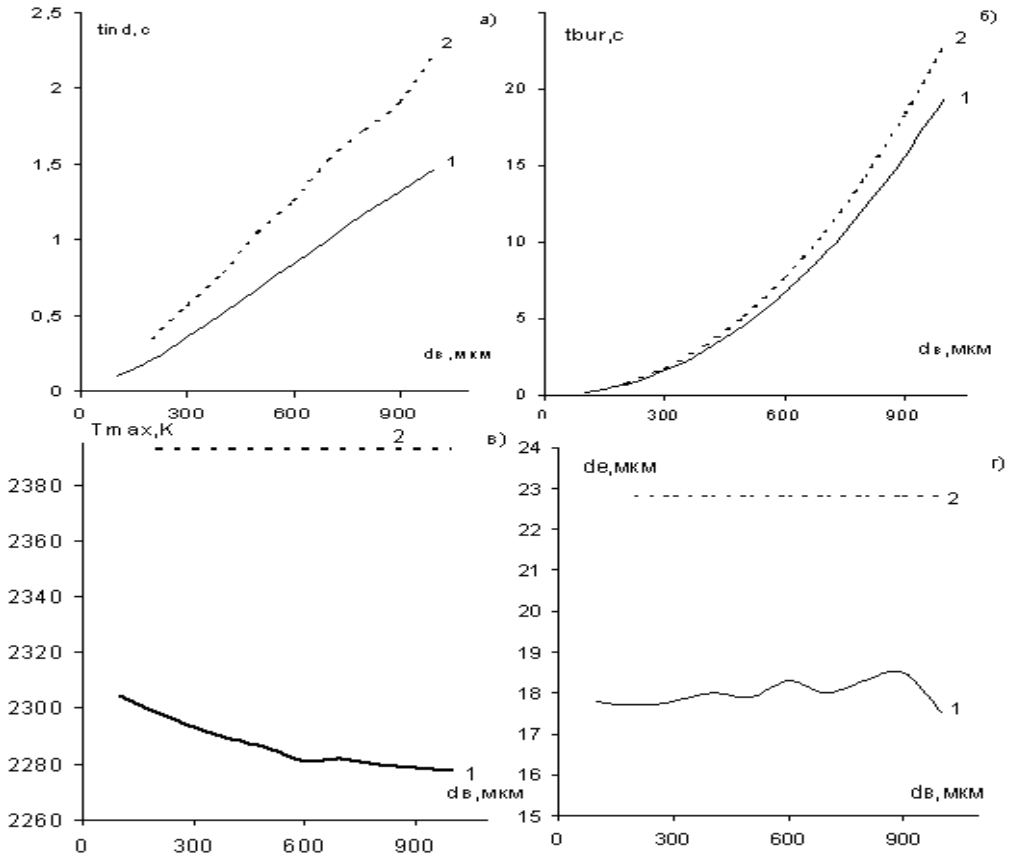

Рис.4 Зависимости периода индукции (а), времени горения (б), максимальной температуры горения (в) и критического диаметра частицы, характеризующего потухание (г) от начального диаметра частицы. T_g =1300К. 1 - расчет с учетом температурного поля по частице; 2 - расчет без учета температурного поля по частице.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ассовский И.Г., Закиров З.Г., Лейпунский О.И. О зажигании и горении топлива в потоке излучающего газа // Физика горения и взрыва. - 1986.- Т.22, №6.- С.20-26.
2. Самуйлов Е.В., Фаминская М.В., Головина Е.С. Модель и расчет процесса газификации одиночной углеродной частицы // Физика горения и взрыва.- 2004.- Т.40, №1.- С.86-94.
3. Головин А.М., Песочин В.Р. О диффузионном режиме горения угольной частицы в высокотемпературной среде // Физика горения и взрыва. - 1989.- Т.25, №6.- С.29-36.
4. Гремячкин В.М., Дудкин В.А., Рухин В.Б. Исследование процессов окисления углерода в высокотемпературной печи//Физико-математическая кинетика в газовой динамике.- 2008.-Т.7.-С.1-6.
5. Гремячкин В.М. О кинетике гетерогенных реакций углерода с кислородом при горении пористых частиц углерода в кислороде // Физика горения и взрыва. - 2006.- том 42, №3. – С.11-22.
6. Гремячкин В.М. Газификация пористой частицы углерода в парах воды // Физико-математическая кинетика в газовой динамике. - 2008. -Т.7. - С.39-45.
7. Калинчак В.В., Орловская С.Г., Калинчак А.И., Дубинский А.В. Тепломассообмен частицы с воздухом при учете стефановского течения и теплопотерь излучением // Теплофизика высоких температур .- 1996. - Т. 34, №1. - С. 83-91.
8. Калинчак В.В., Орловская С.Г., Прудникова Ю.В., Гануи И. Влияние естественной и вынужденной конвекции на характеристики гетерогенного горения углеродной частицы // Инженерно-физический журнал. -1998. - Т.71, №6. - С.1050-1055.