УДК 536.46: 622.612

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ КИСЛОРОДА В ВОЗДУХЕ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ УГЛЕРОДНОЙ ЧАСТИЦЫ

Орловская С.Г.[1], Калинчак В.В.[1], Зуй О.Н.[1], Рябчук Л.И.[1], Качан С.В.[2]

[1]*Одесский национальный университет им. И.И. Мечникова, Одесса, Украина*
[2]*Киевский национальный педагогический университет им. М.П.Драгоманова, Киев, Украина*

АННОТАЦИЯ

Приведены результаты компьютерного моделирования динамики нагрева углеродной частицы при различных концентрациях кислорода в высокотемпературной газовой фазе. Определены критические условия воспламенения, горения и потухания частиц при этих концентрациях. Показано, что все процессы происходят при более высокой температуре и с более высокой скоростью, но, как и в случае относительной массовой концентрации кислорода в воздухе 0.23, полное время горения частицы незначительно превышает время горения поверхности.

ВВЕДЕНИЕ

Классическая теория высокотемпературного тепломассообмена использует стандартную модель прогрева и воспламенения частиц. Эта модель основана на следующих двух приближениях: при определении условий воспламенения и горения частицы учитывается либо средняя температура частицы, либо предполагается, что при попадании в нагретую среду частица мгновенно прогревается до температуры ее поверхности, то есть в предположении бесконечной теплопроводности. При решении задач нестационарного тепломассообмена частицы с высокотемпературной средой необходимо учитывать не только тепловое состояние реагирующего слоя, но и отвод тепла вглубь частицы.

Настоящая работа является продолжением изучения нагрева и горения сферической частицы природного органического топлива в газообразном окислителе [1,2,3] и имеет важное значение для энергетики и химических технологий переработки топлива.

Целью работы является изучение влияния концентрации кислорода в окислительной среде на параметры высокотемпературного тепломассообмена с учетом конечной скорости распространения тепла вглубь углеродного массива.

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Физико-математическая постановка задачи описывается дифференциальным уравнением теплопроводности с граничными условиями третьего рода. Граничные условия учитывают конвективный тепломассообмен частиц с газовой средой и радиационный теплообмен со стенками реакционной установки. При описании химической кинетики, в связи с исследованием сухого вида топлива (антрацита), учитываются реакции окисления углерода до оксида и диоксида.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ УГЛЕРОДНОЙ ЧАСТИЦЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЯХ КИСЛОРОДА В ГАЗОВОЙ СРЕДЕ

На основе компьютерного моделирования задачи анализировалась динамика нагрева частицы при различных концентрациях кислорода в газовой фазе и определялись критические условия воспламенения, горения и потухания. В ходе проводимых исследований изучалось поведение тепловыделений за счет химических реакций, как функции концентрации кис-

лорода в газовой среде и соответствующее поведение временных характеристик температур поверхности и центра сферических частиц, скоростей изменения температур поверхности и центра и изменения диаметра частицы. Расчеты производились для частиц различных размеров при относительных массовых концентрациях кислорода в газовой среде 0.23 и 0.3 в предположении постоянства температуры газа, что справедливо для одиночных частиц.

На рисунке приведены все указанные характеристики процесса при температуре газовой среды T_g 1300 К, начальном диаметре частицы D_b=5·10^{-4} м и ее температуре T_c=300 К.

Из рисунка видно, что при фиксированной температуре окислительной среды с увеличением начальной концентрации кислорода в газовой среде все процессы на поверхности и в внутри частицы ускоряются и происходят при более высоких температурах.

Аналогичные расчеты были проведены для частиц различных размеров:

D_b = 1·10^{-4}, 3·10^{-4}, 8·10^{-4}, 1·10^{-3} м. На основании полученных результатов составлены таблицы, в которых представлены значения периодов индукции t_u, времени горения $t_г$, времени потухания t_n и температуры T частиц, рассчитанные относительно их поверхности (индекс «R») и центра (индекс «0»).

В таблице 1 приведены значения времен индукций, рассчитанные относительно поверхности частицы t_{uR} (а) и ее центра t_{u0} (б), а также температуры поверхности T_R и центра T_0 для этих моментов времени.

Таблица 1.

Характеристики воспламенения углеродной частицы.

	Характеристики	n_{O2} = 0,23				n_{O2} = 0,3			
		d,м				d,м			
		1·10^{-4}	3·10^{-4}	8·10^{-4}	1·10^{-3}	1·10^{-4}	3·10^{-4}	8·10^{-4}	1·10^{-3}
а	t_{uR}, мс	182	360	1120	1390	77	290	1040	1310
	T_R, К	1835	1571	1375	1333	1843	1606	1427	1387
	T_0, К	1736	1438	1194	1123	1617	1367	1159	1100
б	t_{u0}, мс	187	390	1240	1520	81	316	1166	1521
	T_R, К	1936	1687	1440	1376	2088	1820	1573	1516
	T_0, К	1830	1542	1260	1176	1812	1533	1288	1220

В начале стадии инертного прогрева частиц (рис.а) наблюдается различие температур поверхности и центра частиц, которое составляет от 100 К для мелких частиц ~ 10^{-4} м до 200 К для крупных частиц ~ 10^{-3} м при концентрации кислорода n=0.23 (воздух). Различие между этими температурами возрастает до 220÷300 К при увеличении концентрации кислорода до n=0.3. Скорости изменения этих температур возрастают аналогичным образом.

К концу стадии инертного прогрева температура поверхности достигает значения, при которой активируются химические реакции и, следовательно, возрастает химическое тепловыделение. Это способствует более быстрому росту скоростей изменения температур, то есть тепловое и химическое состояние системы связаны друг с другом. Чем выше концентрация кислорода, тем больше плотность химического тепловыделения и, следовательно, температура частицы. Процесс самоускорения реакций окисления происходит за счет роста тепловыделений, которые превышают теплоотвод конвекцией и излучением (рис.б), что приводит к дальнейшему резкому повышению температуры частицы и ее поверхность воспламеняется. По мере распространения тепла вглубь частицы прогреваются ее внутренние слои и через определенный промежуток времени в центре частицы наблюдается максимальный рост температуры [1,2,3]. Из таблицы 1 видно, что разность периодов индукции, рассчитанных относительно поверхности частиц и их центра составляет от 5 мс для мелких частиц до 12 мс для крупных частиц при концентрации кислорода n=0.23. Эта разность незначительно снижается для тех же размеров частиц при концентрации кислорода n=0.3.

Более высокое содержание кислорода в реакционноспособной среде определяет более высокие значения «химических тепловыделений», температуры поверхности и центра частицы и более быстрое сгорание частицы (таблица 2).

Таблица 2.

Характеристики горения углеродной частицы.

	Характеристики	n_{O2} = 0,23				n_{O2} = 0,3			
		d,м				d,м			
в		1·10^{-4}	3·10^{-4}	8·10^{-4}	1·10^{-3}	1·10^{-4}	3·10^{-4}	8·10^{-4}	1·10^{-3}
	$t_{гR}$, мс	0,09	1,21	9,87	15,84	0,08	1,127	6,77	10,88
	$t_г$, мс	0,094	1,23	9,94	15,87	0,083	1,136	6,8	10,91

В течение всего периода горения температура центра образца максимально приближается к температуре поверхности. С увеличением концентрации значительно уменьшается время горения частиц размером 800 и 1000 мкм. Полное время горения частицы t_z (с учетом прогрева ее центра) незначительно превышает времена горения поверхности t_{zR}, что характерно для всех исследуемых диаметров частиц (табл.2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом для различных концентраций кислорода в газовой среде существуют общие качественные особенности временных характеристик зажигания, потухания и длительности горения. При фиксированной температуре окислительной среды с увеличением начальной концентрации кислорода в газовой среде время индукции сокращается в 2 раза для мелких частиц, а для крупных частиц уменьшается незначительно. Все процессы на поверхности и в внутри частицы происходят при более высоких температурах, с более высокой скоростью, процесс горения ускоряется, но, как и в случае концентрации кислорода в воздухе n = 0.23, полное время горения частицы незначительно превышает времена горения поверхности.

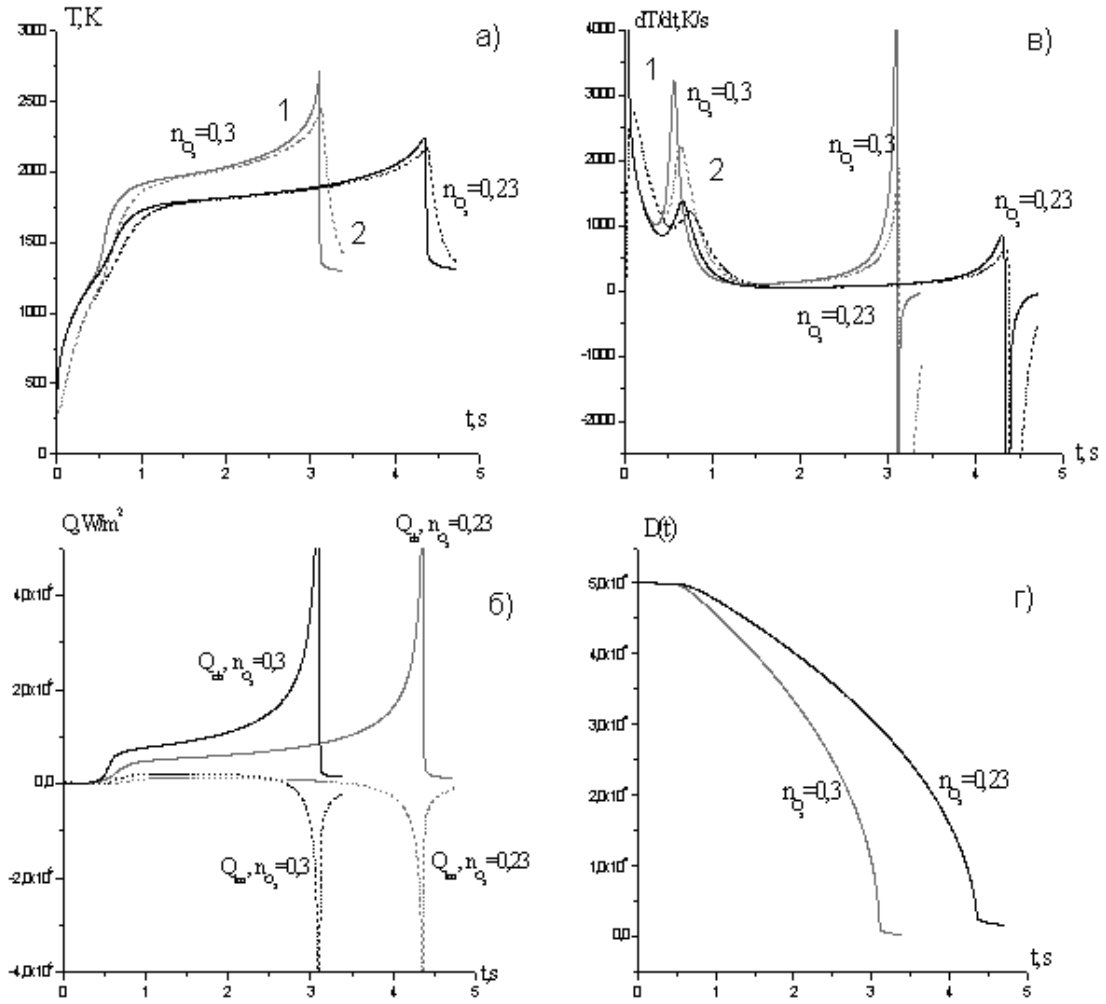

Рис. Временные зависимости: а) температуры поверхности T (1-сплошная) и центра частицы (2 -пунктирная); б) производных dT/dt на поверхности (1-сплошная) и в центре частицы (2- пунктирная); в) изменения тепловыделений за счет химических реакций Q_{ch} и теплоотвода конвективным и радиационным потоками Q_{los}; г) диаметра частицы D при n_{O2} = 0,23 и 0,3 и D_b =5·10^{-4} м.

ЛИТЕРАТУРА

1. Орловская С.Г., Калинчак В.В., Зуй О.Н., Рябчук Л.И. Влияние неоднородности поля температур внутри углеродных частиц на их воспламенение и горение. / Современная наука. Сборник статей №2 (4) 2010. С. 98-103.

   Orlovskaya S.G., Kalinchak V.V., Zuy O.N., Ryabchuk L.I. Influence of heterogeneity of the field of temperatures into carbon particles on their self-ignition and burning. / Modern science. Collection of reasons. №2 (4) 2010. P. 98-103.
2. Orlovskaya S.G., Ryabchuk L.I., Kalinchak V.V., Protas S.K. Study of Heat and Mass Exchange of Coal Particle in High-temperature Oxidizing Medium. / Космический вызов XXI века, Т.4. Химическая и радиационная физика. С. 320-322.
3. Орловская С.Г., Калинчак В.В., Зуй О.Н., Рябчук Л.И. Исследование влияния распределения температуры по углеродной частице и ее пористости на высокотемпературный тепломассообмен с газом. / Современная наука. Сборник статей №2 (7). 2011. С.71-76.

   Orlovskaya S.G., Kalinchak V.V., Zuy O.N., Ryabchuk L.I. Research of influence of distribution of temperature on a carbon particle and her porosity on a high temperature thermal and mass exchange with gas. / Modern science. Collection of reasons. №2 (7). 2011. P.71-76.

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