УДК 536.46:622.612

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА НА ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ, ГОРЕНИЯ И ПОТУХАНИЯ ГАЗОВЗВЕСЕЙ УГЛЕРОДНЫХ ЧАСТИЦ

Орловская С.Г.

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

АННОТАЦИЯ

В работе изучены закономерности влияния тепло- и массообмена газовзвесей углеродных частиц с внешней газовой средой на времена индукции, горения и полного преобразования частиц, критические параметры воспламенения и потухания. Доказано существование верхнего предела по концентрациям топлива и диаметрам частиц, при которых не происходит полного сгорания газовзвесей в условиях отсутствия внешнего массообмена. Найдены интервалы массовых концентраций для которых осуществляется полное преобразование сжигаемого углеродного топлива в виде газовзвесей.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования высокотемпературного тепломассообмена и химического превращения газовзвесей частиц являются актуальными для создания безотходных и экологически чистых технологий сжигания диспергированных твердых топлив в энергетических установках. Разработка рациональных методов использования угольного топлива базируется на изучении закономерностей их воспламенения, горения и потухания при различных режимах тепломассообмена. В литературе имеется недостаточно сведений о роли внешнего тепло- и массобмена газовзвесей с окружающей средой в процессе их воспламенения и горения. В данной работе изучается влияние внешнего тепло- и массообмена на характеристики высокотемпературных процессов и полноту сгорания диспергированного углеродного топлива.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Высокотемпературный тепломассообмен и кинетика окисления газовзвесей углеродных частиц описываются дифференциальными уравнениями, задающими изменения их температуры, массы, температуры газа и концентрации окислителя в нем [1,2]. С учетом обмена теплом и массой поверхности газовзвеси с окружающей средой определим газовзвесь как открытую, без учета – закрытую. Открытые газовзвеси наблюдаются, например, при взрывах угольной пыли в шахтах, когда в газообразной среде возникает облако горящих частиц. В топках можно также реализовать открытые газовзвеси, обеспечив свободный доступ кислорода в реагирующий объем.

В результате физико-математического моделирования задачи [1,2] проведем анализ влияния внешнего массо- и теплообмена на характеристики воспламенения, горения и потухания монодисперсной газовзвеси углеродных частиц при различных массовых концентрациях.

На рис.1 представлены временные зависимости температуры (T) и диаметра (d) частиц газовзвеси в процессе воспламенения, горения и потухания при массовой концентрации C_m=0,014 кг/м^3 и коэффициенте избытка кислорода η=3.7. Точка I – момент воспламенения частицы за время равное периоду индукции

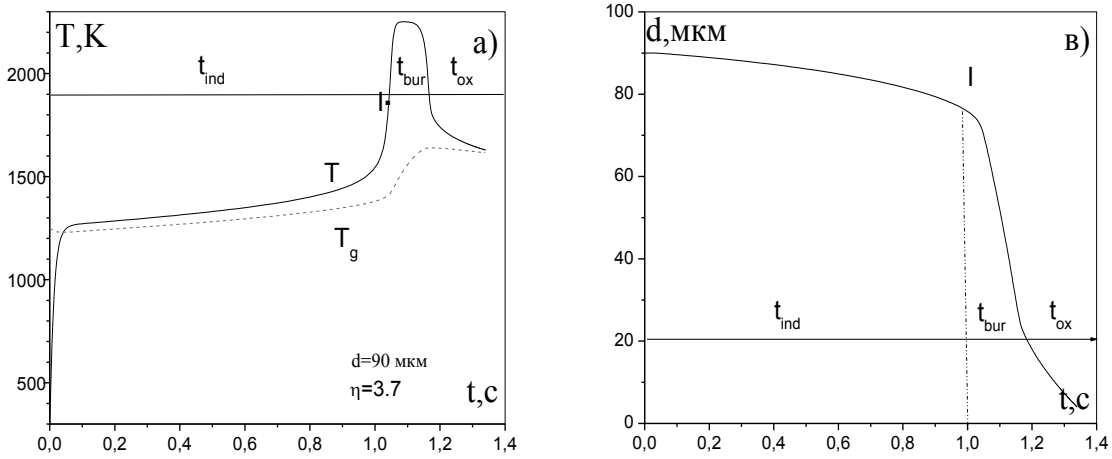

Рис.1 Зависимости температуры и диаметра частицы от времени для d_b=90 мкм, C_m=0,014 кг/м^3, температуры окружающего газа $T_{g\infty}$=1250 K.

(t_{ind}). На стадии горения (t_{bur}) происходит основное уменьшение диаметра частицы. Последняя низкотемпературная стадия – доокисление частицы продолжительностью t_{ox} протекает в кинетическом режиме и характеризуется медленным уменьшением температуры и диаметра частицы. Время полного преобразования частицы t_{full} включает в себя время горения и время окисления частицы до нуля, отсчитываемое после момента ее потухания, $t_{full} = t_{bur} + t_{ox}$ (рис.1). С увеличением массовой концентрации топлива в газовзвеси длительность стадии доокисления возрастает, что определяется уменьшением температуры частиц и концентрации кислорода у их поверхности после момента потухания.

На рис.2 представлены временные зависимости температуры, диаметра частицы, концентрации кислорода $n_{O_{2,s}}$ и скорости химического реагирования W на поверхности частицы для плотной газовзвеси с учетом внешнего массо- и теплообмена. На стадии воспламенения концентрация кислорода резко уменьшается (рис.2 в). Затем наблюдается двухстадийный режим горения. На первой стадии диаметр частицы изменяется с большой скоростью, а затем происходит торможение скорости химической реакции вследствие уменьшения концентрации окислителя. Высокотемпературная стадия протекает в переходном режиме достаточно продолжительное время. При этом, в результате уменьшения диаметра и увеличения концентрации кислорода на поверхности частицы, скорость химических превращений снова возрастает (рис.2 г). К концу высокотемпературной стадии увеличивается также и коэффициент избытка кислорода. Температура горения растет и достигает вторично максимального значения. Высокотемпературный режим завершается вырожденным режимом потухания, в котором частицы, уже достаточно малого диаметра, полностью окисляются. Таким образом, с учетом внешнего массообмена наблюдаются, хотя и достаточно продолжительные, но фиксированные времена полного преобразования частиц.

В случае закрытой газовзвеси кислород в объеме вскоре выгорает. Химическая реакция на поверхности частиц протекает в кинетическом режиме, а затем затухает. Частицы плотных газовзвесей при таких режимах массообмена потухают при диаметре, близком к начальному.

Времена индукции открытых и закрытых газовзвесей отличаются незначительно. Критические диаметры и массовые концентрации частиц, характеризующие воспламенение газовзвесей, с учетом и без учета внешнего массообмена при $T_{g\infty}$= 1250 K имеют следующие близкие значения: открытые газовзвеси: d_I =82 мкм, C_{mI}= 0,008 кг/м^3; закрытые газовзвеси: d_I =78 мкм, C_{mI}= 0,007 кг/м^3.

Значительно больше влияние внешнего массо- и теплообмена на времена полного преобразования частиц и на критический диаметр, определяющий их потухание.

На рис.3 представлены времена горения в сравнении с временами полного преобразования частиц до нуля для случаев открытых и закрытых газовзвесей, а также зависимости

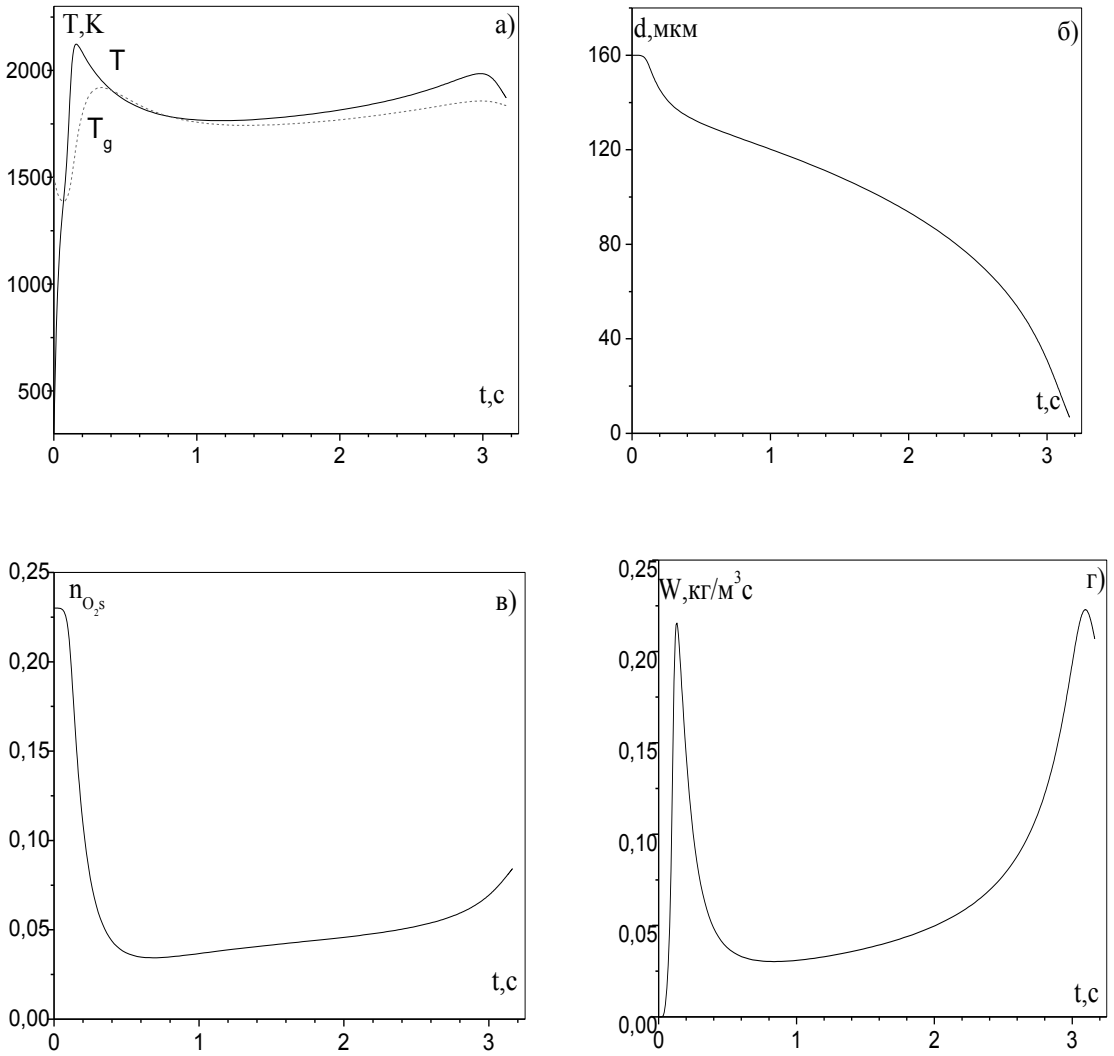

Рис.2 Временные зависимости $T, d, n_{O_2,s}, W$ для плотной газовзвеси частиц с учетом внешнего массообмена с окружающей средой. d_b = 160 мкм, C_m=0,06 кг/м^3, $T_{g\infty}$ = 1500 К.

критического диаметра частиц при потухании от их начального диаметра.

Видно, что существует такая область начальных диаметров частиц и, соответственно, массовых концентраций, при которых газовзвеси сгорают практически полностью. В этом интервале диаметров времена горения и полного преобразования частиц практически совпадают. Для указанных интервалов начальных диаметров потухание является вырожденным. На зависимостях *dT/dt (t)* минимум, характеризующий потухание [1], слабо выражен. Соответственно на зависимостях *d(t)* отсутствует характерный излом, определяющий скачкообразный переход химических реакций в низкотемпературный режим протекания. При вырожденных режимах потухания наблюдаются малые времена доокисления частиц до нуля. Времена полного преобразования для них минимальны. Дальнейшее увеличение начального диаметра приводит к росту критического диаметра, характеризующего потухание (рис.3 в,г), уменьшению времени горения и существенному росту времени полного преобразования. Эти явления связаны с уменьшением концентрации кислорода в объеме газовзвеси, и, следовательно, у поверхности частицы с ростом массовой концентрации. В условиях недостатка кислорода частицы горят непродолжительное время и поту-

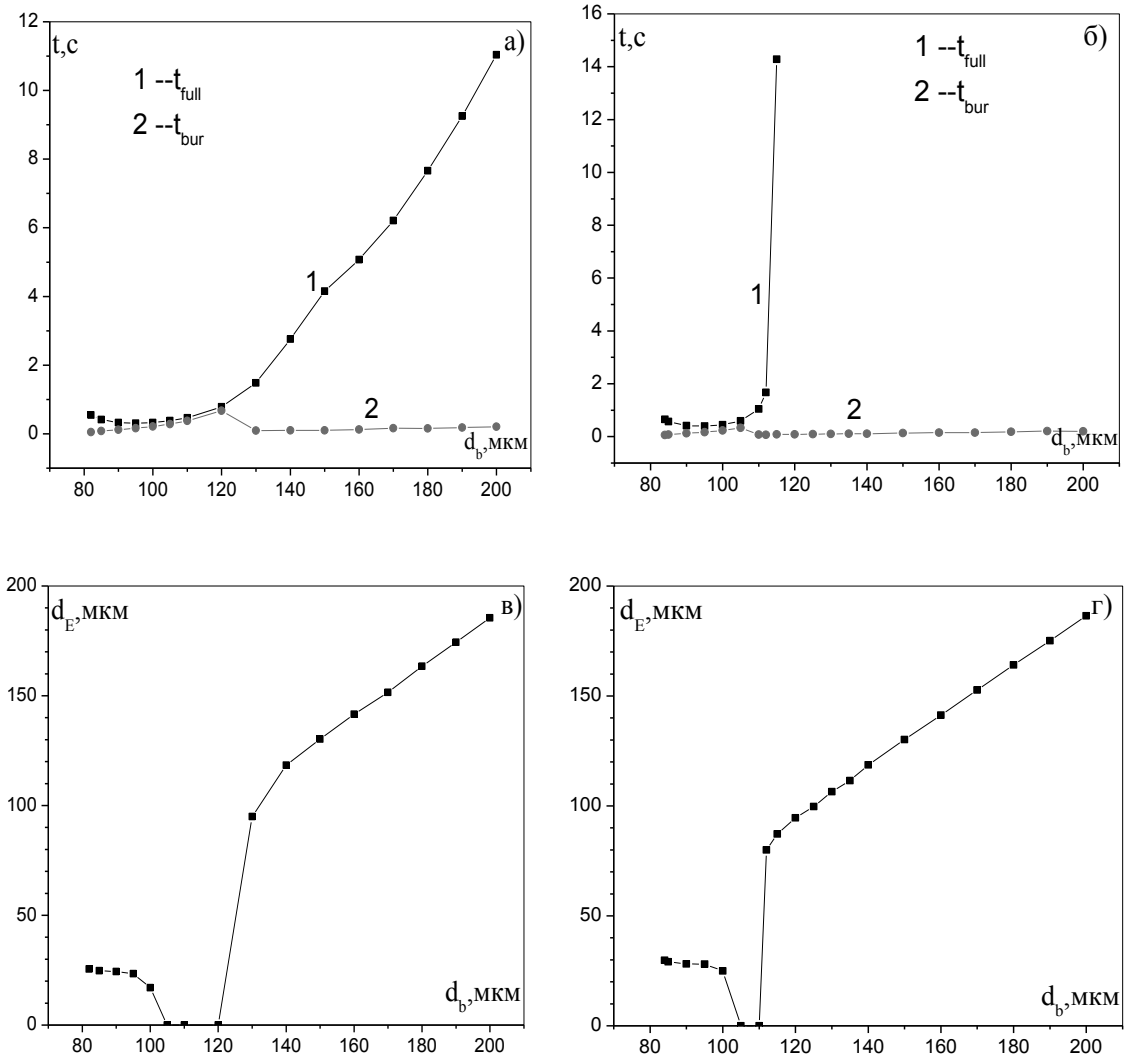

Рис.3 Зависимости времени горения t_{bur}, времени полного преобразования t_{full} и критиче ского диаметра d_E, характеризующего потухание частиц, от их начального диаметра. $T_{g\infty}$ =1250 К. а, в) – с учетом внешнего тепломассообмена; б, г) – без учета.

хают при больших диаметрах. В дальнейшем начинается продолжительная стадия доокисления в кинетическом режиме, что приводит к росту времени полного преобразования.

На зависимостях времени полного преобразования частиц от их начального диаметра (соответственно массовой концентрации (рис.4)) наблюдается минимум, который объясняется ростом теплопотерь молекулярно-конвективным путем с уменьшением диаметра. Стадия доокисления частиц, размеры которых лежат вблизи критического диаметра воспламенения d_I (начало интервала d_b [1]), протекает в глубоко кинетическом режиме. Следовательно, низкотемпературный тепловой режим частиц и его продолжительность t_{ox} определяются в основном теплообменом с газом. С уменьшением диаметра растут теплопотери от частиц, что и приводит к увеличению времени полного преобразования в области малых размеров (концентраций) частиц.

Для закрытых газовзвесей наблюдается резкое увеличение времени полного преобразования с ростом массовой концентрации топлива (рис.4 а, кривая 1). Видно, что существует такая предельная массовая концентрация (предельный большой диаметр частицы), выше которых полного сгорания закрытых газовз-

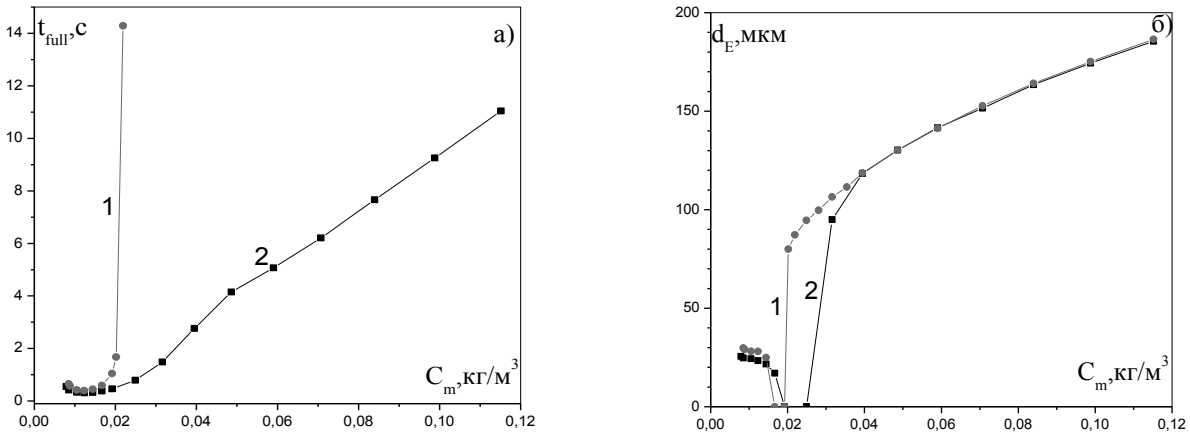

Рис.4 Зависимости времени полного преобразования и критического диаметр d_E от массовой концентрации частиц в газовзвеси. $T_{g\infty}$ =1250 К. 1 – без учета внешнего тепломассообмена; 2 – с учетом.

весей не происходит. Для открытых газовзвесей (рис.4а, кривая 2) существуют, хотя и продолжительные, но конечные времена полного преобразования частиц для всей области рассматриваемых массовых концентраций. Резкое увеличение t_{full} в отсутствии внешнего массообмена связано с выгоранием на стадии воспламенения кислорода в объеме газовзвеси до нуля и затуханием, в результате этого, химических реакций на поверхности частицы.

Из рис.4 б видно, что для открытых газовзвесей область массовых концентраций, где наблюдается полное преобразование частиц, расширяется в сторону больших значений. Диаметры частиц, характеризующие потухание газовзвесей, с учетом внешнего массопереноса меньше в результате дополнительного поступления кислорода.

При повышении температуры окружающего газа до $T_{g\infty}$=1500К интервал массовых концентраций, в котором наблюдается полное преобразование частиц топлива, расширяется почти в 2 раза. В этом интервале времена t_{bur} и t_{full} практически совпадают. Значения предельных концентраций, выше которых воспламенение закрытых газовзвесей не происходит, для случаев $T_{g\infty}$=1250 К и $T_{g\infty}$=1500 К отличаются незначительно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Орловська С.Г. Вплив колективного ефекту на характеристики високотемпературного тепломасообміну сукупностей поруватих вуглецевих частинок // Фізика і хімія твердого тіла. - 2011.- Т.12, №2.- С. 490 - 499.
2. Orlovskaya S.G., Kalinchak V.V., Zuy O.N., Mandel O.V., Kachan S.V. Heat and mass transfer and critical phenomenas in the gas mixtures of carbon particles // Ukr. J. Phys. 2011. T.56, №12. C1305-1311.