

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА СКОРОСТЬ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИИ УГЛЕРОДА С ВОЗДУХОМ В ПРОЦЕССЕ ГОРЕНИЯ

Селиванов С.Е., Тригуб С.Н.

Херсонская государственная морская академия

Калинчак В.В., Черненко А.С.

Одесский национальный университет имени И.И. Мечникова

Работа посвящена актуальной проблеме – профилактике пожарной опасности на судне, связанной с исследованием влияния различных факторов: температуры окружающего воздуха, скорости обдува воздухом, диаметра частицы, относительной скорости движения частицы в воздухе на суммарную скорость химических реакций углерода с газами, что дает возможность изменять характеристики горения, а при оптимальных условиях дает возможность регулировать процесс горения и тем самым обезопасить судно от пожара, что обусловило цель работы. В соответствии с поставленной целью в работе рассмотрена реакционная способность углеродной частицы и построена зависимость скорости химической реакции от температуры при разных скоростях обдува углеродной частицы разного диаметра, проведен анализ влияния скорости обдува на температуру горения частицы при различных ее размерах, исследовано влияние скорости обдува на критические температуры и диаметры воспламенения и погасания. Показано, что при невысоких температурах, меньших 1500 К (диффузионно-кинетическое отношение меньше единицы), скорость химических реакций частицы углерода с воздухом практически не зависит от скорости обдува. В области больших температур (диффузионно-кинетическое отношение больше единицы), с ростом скорости обдува увеличивается скорость реакции. Установлены закономерности влияния температуры нагретого воздуха и скорости обдува на диаметры воспламенения и погасания, а также на температуру и скорость горения углеродной частицы.

***Ключевые слова:** профилактика, пожарная опасность, углеродная частица, скорость химической реакции, температура, диаметр частицы, скорость обдува воздуха, относительная скорость движения углеродной частицы, горение, воспламенение, погасание.*

Введение. Пожары на морских судах – явление довольно частое. Из общего количества аварийных случаев на морских судах в среднем до 6 % приходится на пожары. Взрывы и пожары представляют большую опасность для морских судов и приводят к крупным потерям материальных ценностей, а во многих случаях – и к человеческим жертвам.

Среди многих источников воспламенения на судах являются: выхлопные и дымовые газы, электрогазовая сварка и резка, искры при ударе твердых тел, трение, электрические искры,

Основными причинами образования искр при работе котлов являются:

– большой механический унос топлива в результате конструктивных недостатков топок, усиленное дутье, а также применение топлива не того сорта, на которое котел рассчитан;

– неполное сгорание топлива в результате недостаточной подачи воздуха, чрезмерной подачи топлива, недостаточного распыления жидкого топлива;

– нарушение сроков очистки топок и дымовых труб от сажи.

Основные причины образования искр и нагара при работе дизелей следующие:

– неправильная регулировка системы подачи топлива;

– загрязнение топлива смазочным маслом и минеральными примесями;

– длительная работа двигателя с перегрузкой;

– нарушение сроков очистки выпускной системы от нагара.

Искры представляют собой твердые раскаленные частички горючего вещества – сажи (нагара). Воспламеняющая способность искры зависит от ее температуры, теплосодержания и времени действия. Температура искр, достигающая 500–600 °С, достаточна для воспламенения почти всех горючих веществ. Искры, попавшие в трюмы

сухогрузных судов, на палубы и даже во внутренние помещения, часто являлись причиной возникновения пожара.

Актуальность исследований. Отметим, что сажа – аморфный углерод, продукт неполного сгорания или термического разложения углеводородов в неконтролируемых условиях, т.е. в условиях пожара.

Угольные частицы при наличии кислорода в смеси способны разогреваться до высокой температуры.

Если угольная частица движется, то, с одной стороны, возрастает теплоотдача к газу от поверхности частицы. С другой стороны, увеличивается подвод кислорода к поверхности частицы и, следовательно, должны повышаться скорости химических реакций. Однако это происходит при высоких температурах, когда скорость реакции определяется скоростью диффузии кислорода и углекислого газа. Известно, что скорость химической реакции углерода с кислородом лежит в основе процесса горения угольной частицы.

Очевидно, что исследование влияния различных факторов на скорость химических реакции углерода с кислородом воздуха в процессе горения изменяет характеристики горения и при оптимальных условиях дает возможность регулировать процесс горения и тем самым обезопасить в данном случае судно от пожара, поэтому данная работа является актуальной.

Целью данной работы является исследование влияния температуры, скорости обдува воздуха, диаметра частицы, относительной скорости движения частицы в воздухе на суммарную скорость химических реакций.

В соответствии с поставленной целью в работе рассмотрена реакционная способность углеродной частицы и построена зависимость скорости химической реакции от температуры при разных скоростях обдува углеродной частицы разного диаметра, зависимость скорости химической реакции от относительной скорости частицы в воздухе, зависимость стационарной температуры от относительной скорости частицы.

Постановка задачи. Опытами установлено, что в результате взаимодействия кислорода с раскаленной углеродной поверхностью на поверхности частицы протекают две экзотермические гетерогенные реакции $C + O_2 = CO_2$ (I), $2C + O_2 = 2CO$ (II) и вторичная гетерогенная эндотермическая реакция между нагретым углеродом и углекислотой: $C + CO_2 = 2CO$ (III).

Химическая реакция (III) существенно влияет на теплообмен углеродной частицы с окружающим газом, как отметили, только при высоких температурах T , что объясняется большой энергией активации E , Дж/моль скорости химической реакции и относительно малой концентрации Z_{CO_2s} на поверхности частицы.

Поскольку углеродная частица представляет собой пористый материал, то эти три гетерогенные реакции могут протекать как на внешней поверхности частицы, так и внутри пористой частицы.

По сценарию работы Калинин В. В. [1] проведем анализ определения суммарной скорости химического реагирования углеродной частицы (в $kg/(m^2 \cdot s)$) по кислороду.

Суммарная скорость W_C убыли углеродного материала при каждой гетерогенной реакции (I)–(III) определится как:

$$W_C = (W_C)_I + (W_C)_{II} + (W_C)_{III}.$$

По определению, скорость химической реакции по исходному компоненту (i) или продукту реакции (j) – это скорость уменьшения или увеличения, соответственно, массы исходного вещества или продукта реакции, приходящейся на единицу внешней поверхности частицы:

$$W_i = \frac{1}{\pi d^2} \frac{\partial m_i}{\partial t}, \quad W_j = \frac{1}{\pi d^2} \frac{\partial m_j}{\partial t}.$$

В частности, скорость реагирования углеродной частицы по углероду определяется выражением:

$$W_C = -\frac{1}{\pi d^2} \frac{\partial m_C}{\partial t}.$$

Связь между скоростью по другим газообразным компонентам определяют из уравнений химических реакций на основе закона сохранения массы

$$(W_C)_I = \frac{M_C}{M_{O_2}} (W_{O_2})_I, \quad (W_C)_{II} = \frac{2M_C}{M_{O_2}} (W_{O_2})_{II}, \quad (W_C)_{III} = \frac{M_C}{M_{CO_2}} (W_{CO_2})_{III}.$$

Здесь M_C , M_{O_2} , M_{CO_2} – молярные массы углерода, кислорода и углекислого газа.

Если обозначим $(W_{O_2})_{I,s}$, $(W_{O_2})_{II,s}$, $(W_{CO_2})_{III,s}$ как скорости химических реакций по кислороду и углекислому газу в реакциях (I)–(III) на поверхности частицы, кг/(м²с), то с учетом теории столкновений и закона действующих масс скорости гетерогенных химических реакций (I)–(III) по активному компоненту (газообразному веществу, находящемуся в недостатке) пропорциональны концентрации активного компонента и увеличиваются с ростом температуры по закону Аррениуса, т.е. зависимости констант скоростей химических реакции (I)–(III) k_i , м/с от температуры:

$$k_i = k_{0_i} \exp \left[-\frac{E_i}{RT} \right],$$

где k_{0_i} – предэкспоненты констант скоростей химических реакции (I)–(III), $R = 8,31$ Дж/(мольК) – универсальная газовая постоянная, (согласно результатам обработки экспериментальных данных по кинетике взаимодействия углерода с газами [2] используем связь между энергиями активации E и предэкспоненциальными множителями k_0 :

$$\frac{E_{2C+O_2 \rightarrow 2CO}}{E_{C+O_2 \rightarrow CO_2}} = 1,1, \quad \frac{E_{C+CO_2 \rightarrow 2CO}}{E_{C+O_2 \rightarrow CO_2}} = 2,2,$$

где $k_* = 100$ м/с и $T_* = 2600$ К).

Запишем скорости химических реакций по кислороду и углекислому газу в виде:

$$(W_{O_2})_{I,s} = k_1 \rho_{gs} Z_{O_{2,s}}, \quad (W_{O_2})_{II,s} = k_2 \rho_{gs} Z_{O_{2,s}}, \quad (W_{CO_2})_{III,s} = k_3 \rho_{gs} Z_{CO_{2,s}},$$

где k_1 , k_2 , k_3 – константы скоростей химических реакции (I) – (III), м/с; ρ_{gs} – плотность газа на поверхности частицы, кг/м³: $\rho_{gs} = \rho_{g0} \frac{T_0}{T} \frac{P}{P_0}$, P – давление газа, Па; ($P_0 = 0.1$ МПа); $Z_{O_{2,s}}$, $Z_{CO_{2,s}}$ – относительные массовые концентрации кислорода и углекислого газа на поверхности частицы.

Поверхностные концентрации кислорода и углекислого газа $Z_{O_2,s}$, $Z_{CO_2,s}$ зависят от скорости химических реакций и от скорости массопереноса кислорода и углекислого газа к единице поверхности частицы:

$$Z_{O_2,s} = \frac{1}{1 + Se} Z_{O_2,0},$$

где Se – число Семенова, диффузионно-кинетическое отношение:

$$Se = \frac{k_1 + k_2 + k_v + U_{s0}}{\beta},$$

где $\beta = D_g Nu / d$ – коэффициент массопереноса кислорода к поверхности, $Nu = 2 + a Re^n$ – число Нуссельта, $Re = \omega d / \nu_g$ – число Рейнольдса, d – диаметр частицы, U_{s0} – массовая скорость стефановского течения, возникающего у поверхности частицы в результате появления избыточной массы газа, направленного от поверхности частицы.

Скорость стефановского течения определяется процессами превращения углерода в газообразные вещества и массообменном частицы углерода с газовой фазой. В результате решения задач внешней и внутренней диффузии [1] скорость стефановского течения на поверхности частицы определится как

$$U_{s0} = \frac{M_C}{M_{O_2}} (k_1 + 2k_2) \left(1 + \frac{k_v}{k_1 + k_2} \right) \left(\frac{\beta}{\beta + k_1 + k_2 + k_v} \right) Z_{O_2,0} + \frac{M_C}{M_{CO_2}} (k_3 + k_{v3}) \left(\frac{M_{CO_2}}{M_C} \frac{k_1 \left(1 + \frac{k_v}{k_1 + k_2} \right)}{\beta + k_3 + k_{v3}} \left(\frac{\beta}{\beta + k_1 + k_2 + k_v} \right) Z_{O_2,0} + \left(\frac{\beta}{\beta + k_3 + k_{v3}} \right) Z_{CO_2,0} \right).$$

$$Z_{CO_2,s} = \frac{M_{CO_2}}{M_{O_2}} \frac{k_1 \left(1 + \frac{k_v}{k_1 + k_2} \right)}{\beta + U_{s0} + k_3 + k_{v3}} Z_{O_2,s} + \frac{\beta}{(\beta + U_{s0} + k_3 + k_{v3})} Z_{CO_2,0},$$

где M_C , M_{O_2} , M_{CO_2} – молярные массы углерода, кислорода и углекислого газа [1].

С учетом выше приведенных формул определим скорости реакций по углероду в результате реакций взаимодействия углерода с кислородом и углекислым газом:

$$\left. \begin{aligned} (W_C)_I &= \frac{M_C}{M_{O_2}} k_1 \left[1 + \frac{k_v}{k_1 + k_2} \right] \rho_{gs} Z_{O_2,s} \\ (W_C)_{II} &= \frac{2M_C}{M_{O_2}} k_2 \left[1 + \frac{k_v}{k_1 + k_2} \right] \rho_{gs} Z_{O_2,s} \\ (W_C)_{III} &= \frac{M_C}{M_{CO_2}} (k_3 + k_{v3}) \rho_{gs} Z_{CO_2,s} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где $k_v = \frac{D_v}{r_s}(Se_v \operatorname{cth} Se_v - 1)$, $k_{v3} = \frac{D_v}{r_s}(Se_{v3} \operatorname{cth} Se_{v3} - 1)$, $Se_v = \sqrt{\frac{(k_1 + k_2)r_s^2 F_v}{D_v}}$,
 $Se_{v3} = \sqrt{\frac{k_3 r_s^2 F_v}{D_v}}$.

Теплофизические свойства газа (коэффициент диффузии, коэффициент кинематической вязкости, удельная теплопроводность, плотность) рассчитываются согласно зависимостям:

$$D = D_0 \left(\frac{T + T_0}{2T_0} \right)^n, \quad \nu = D Pr, \quad c = c_0 + \Omega(T - T_0), \quad \rho_{g0} = \rho_{g0} \frac{T_0}{T}.$$

Коэффициент внутренней диффузии выражается через порозность частицы

$$D_v = m^2 \cdot D_g, \quad m = 1 - \frac{\rho}{\rho_{real}},$$

где m – порозность частицы; ρ , ρ_{real} – плотность углеродной частицы и истинного вещества частицы.

Влияние скорости движения углеродной частицы на ее характеристики горения. Получив формулу (1) для вычисления суммарной скорости W_C убыли углеродного материала при каждой гетерогенной реакции (I)–(III) и проведя расчеты с известными параметрами: $E_1 = 160 \cdot \text{кДж/моль}$, $F_{v0} = 2 \cdot 10^5 \text{ м}^{-1}$, $\rho = 1440 \text{ кг/м}^3$, $m = 0.1$, $a = 0.54$, $n = 0.5$; $D_{g0} = 3.2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$; $\rho_{g0} = 0.277 \text{ кг/м}^3$; $T_0 = 1273 \text{ К}$, $c_{g0} = 1185 \text{ Дж/(кг·К)}$, давление газовой смеси $P = 1 \text{ атм}$ в среде Mathcad 15 [3] получены зависимости суммарной скорости химической реакции W_C преобразования углерода от температуры при различных относительных скоростях движения частицы в газе.

На рис. 1, 2 представлены графики суммарной скорости химической реакции W_C преобразования углерода от температуры при различных относительных скоростях обдува воздуха частицы.

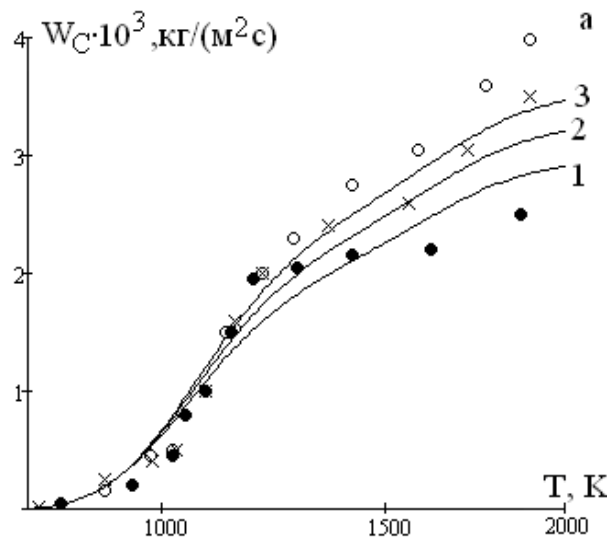


Рисунок 1 – Зависимость скорости химической реакции W_C от температуры при различных скоростях обдува воздуха частицы антрацита АШ диаметром 15 мм:
 1 – 0.027 м/с, 2 – 0.060 м/с, 3 – 0.100 м/с. о, х, ● – данные [4]

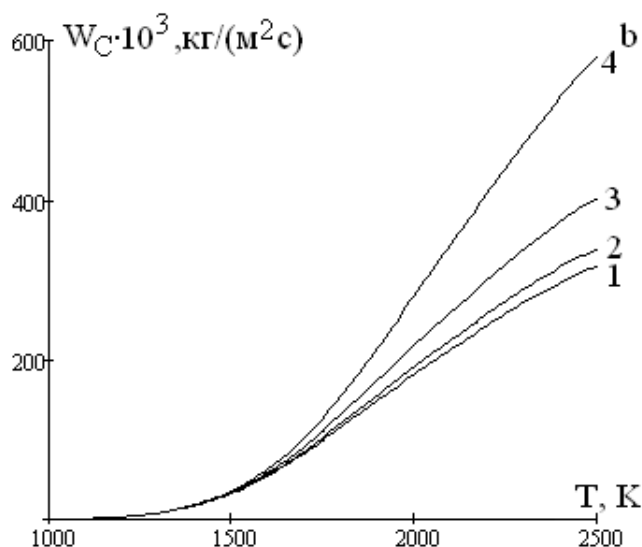


Рисунок 2 – Зависимость скорости химической реакции W_C от температуры при различных скоростях обдува воздуха частицы антрацита АШ диаметром 100 мкм:
 1 – 0.1 м/с, 2 – 1 м/с, 3 – 10 м/с, 4 – 100 м/с

Влияние скорости воздуха [4] мало при низких температурах, когда определяющим процессом является химическая реакция (число Семенова $Se \ll 1$), и становится значительным при высоких температурах, когда существенную роль играет диффузия (число Семенова $Se \gg 1$). Увеличение скорости приводит к возрастанию числа Нуссельта, а, следовательно, скорости массопереноса окислителя к поверхности частицы.

Так, для крупной частицы (рис.1) можно выделить три области. При $T < 1200$ К наблюдается кинетический режим протекания реакций (I)–(II) и реакцией (III) можно пренебречь. При $1200 < T < 1700$ К переходной режим (Se порядка 1) протекания реакций (I)–(II) и реакцией (III) можно пренебречь. При $T > 1700$ К дополнительное увеличение скорости преобразования углерода за счет эндотермической реакции (III). С уменьшением размера частицы эти области смещаются в более высокие значения температуры (рис. 2).

Для выяснения влияния скорости движения на температуру и критические условия горения углеродной частицы рассмотрим условие стационарности температуры [5, 6]:

$$\begin{aligned} (Q_1 k_1 + Q_2 k_2) Z_{O_2} \rho_{gs} \left(1 + \frac{k_v}{k_1 + k_2} \right) (1 + Se)^{-1} = \\ = \beta \rho_g c_g (T - T_g) + \frac{1}{2} U_{s0} c_g \rho_{gs} (1 + Se)^{-1} + q_w, \\ q_w = \varepsilon \sigma (T^4 - T_w^4). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь ε – коэффициент черноты поверхности частицы, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м⁴К) – постоянная Стефана-Больцмана.

Правая часть равенства (2) описывает химическое тепловыделение на единице поверхности в результате гетерогенных реакций (I)–(II). Левая часть – теплообмен кондуктивно-конвективным путем единицы поверхности с окружающим газом с поправкой на стефановское течение и тепловым излучением с окружающими телами. Гетерогенной реакцией (III) при рассмотрении горения и воспламенения мелких частиц можно пренебречь.

В процессе горения число Семенова $Se_v > 5$, что позволяет представить константу внутреннего реагирования k_v , независящую от диаметра частицы, в виде:

$$k_v \approx \sqrt{F_v D_V (k_1 + k_2)}.$$

В этом случае условие стационарности (2) можно представить в виде зависимости числа Нуссельта от стационарной температуры при заданном диаметре частицы:

$$Nu_1 = d \frac{Q_1 k_{01} \left(1 + \frac{Q_2 k_2}{Q_1 k_1}\right) \left(1 + \frac{k_v}{k_1 + k_2}\right) Z_{O_2} \left(B + \sqrt{B^2 - A_g A_w}\right)}{D_g (T - T_g)} \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right), \quad (3)$$

$$Nu_2 = \frac{d}{D_g} \cdot \frac{(k_1 + k_2 + k_v + U_{sk})}{q_{ch,m}} \cdot \frac{\varepsilon \sigma (T^4 - T_w^4)}{\left(B + \sqrt{B^2 - A_g A_w}\right)}, \quad (4)$$

$$q_{ch,m} = (Q_1 k_1 + Q_2 k_2) \left(1 + \frac{k_v}{k_1 + k_2}\right) \rho_{gs} Z_{O_2},$$

$$A_g = \frac{c_g \rho_{gs} (k_1 + k_2 + k_v + U_{sk}) (T - T_g)}{q_{ch,m}}, \quad A_{st} = \frac{U_{sk} \rho_{gs} c_g T_*}{q_{ch,m}},$$

$$B = \frac{1}{2} (1 - A_g - A_w - A_{st}).$$

Для выделения относительной скорости частицы (или скорости потока) используем следующую зависимость числа Нуссельта от числа Рейнольдса:

$$Nu = 2 + 0,16 Re^{2/3}.$$

В результате для фиксированного размера частицы имеем две зависимости относительной скорости частицы от стационарной температуры частицы:

$$\omega_{1,2} = \frac{v_g}{d} \left[\frac{Nu_{1,2} - 2}{0,16} \right]^{3/2}. \quad (5)$$

Согласно (3)–(5), $\omega \xrightarrow{T \rightarrow T_g} \infty$ и $\omega \xrightarrow{T \rightarrow T_w} 0$. При этом мощность химического тепловыделения становится пренебрежимо малой по сравнению с теплообменом с газом в первом, и с теплообменом излучением – во втором случае.

На рис. 3, 4 представлены зависимости стационарной температуры и скорости химической реакции по углероду для частицы разных диаметров от относительной скорости движения углеродной частицы. Выбранные диаметры взяты таким образом, чтобы $d_1 < d_{i0}$ для неподвижной частицы, а $d_2, d_3 > d_{i0}$. Данные зависимости являются параметрическими (параметр – температура частицы), расчет которых велся по (1) и (5) с учетом (3)–(4).

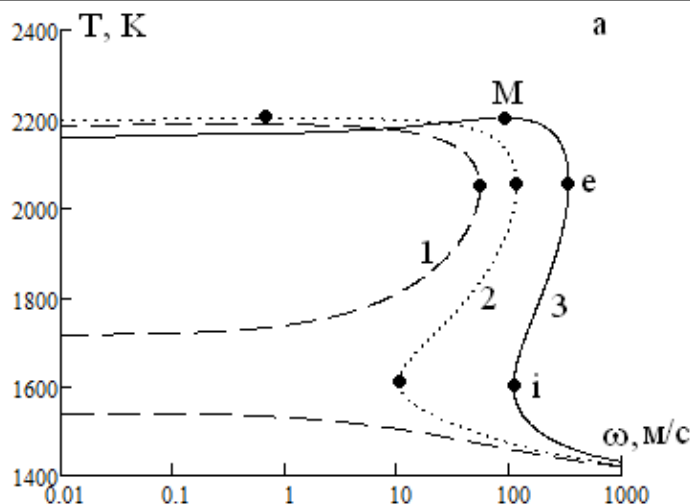


Рисунок 3 – Зависимость стационарной температуры от относительной скорости частицы в воздухе с температурой $T_g = T_w = 1400$ К и разных диаметров: 1 – $d = 50$ мкм, 2 – $d = 60$ мкм, 3 – $d = 100$ мкм

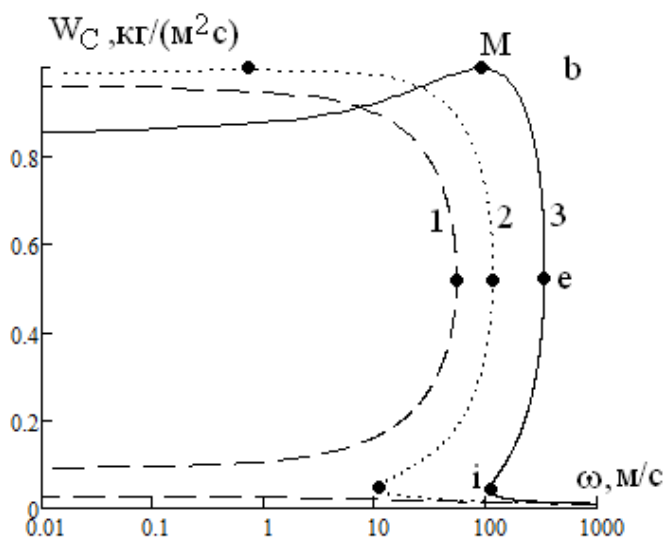


Рисунок 4 – Зависимость скорости химической реакции от относительной скорости частицы в воздухе с температурой $T_g = T_w = 1400$ К и разных диаметров: 1 – $d = 50$ мкм, 2 – $d = 60$ мкм, 3 – $d = 100$ мкм

При высоких температурах газа и стенок при относительной массовой концентрации кислорода $Z_{O_2} = 0,23$ существует только один явно выраженный предел горения по скорости обтекания (точка e). Самопроизвольно (т.е. независимо от начальной температуры) воспламеняются только те частицы, для которых относительная скорость движения ниже ω_i : возрастание скорости потока способствует увеличению коэффициента теплообмена частицы с газом и ухудшению условий самовоспламенения частицы.

Частицы, относительная скорость в газе которых принадлежит интервалу (ω_i, ω_e) , переходят на высокотемпературный режим тепломассообмена только при увеличении их начальной температуры выше температуры, соответствующей кривой, соединяющей критические точки (точки i и e).

С уменьшением диаметра частицы максимальные температуры частицы, естественно, уменьшаются (рис. 3). С ростом относительной скорости частицы ($d \gg d_{i0}$) за счет возрастания массопереноса кислорода к поверхности частицы квазистационарная

температура высокотемпературного окисления возрастает. Для частиц, размеры которых близки к критическому диаметру воспламенения, влияние скорости на температуру горения мало.

Критические значения скоростей, соответствующих самовоспламенению и погасанию, с уменьшением диаметра частицы уменьшаются достаточно быстро (рис. 4). Обращаем внимание на существование минимальных диаметров, которые ограничивают области самовоспламенения и погасания.

На рис. 5 приведены критические значения диаметра и скорости движения частицы, при которых происходит смена режима теплообмена ($d_i(\omega)$ – самовоспламенение, $d_e(\omega)$ – погасание).

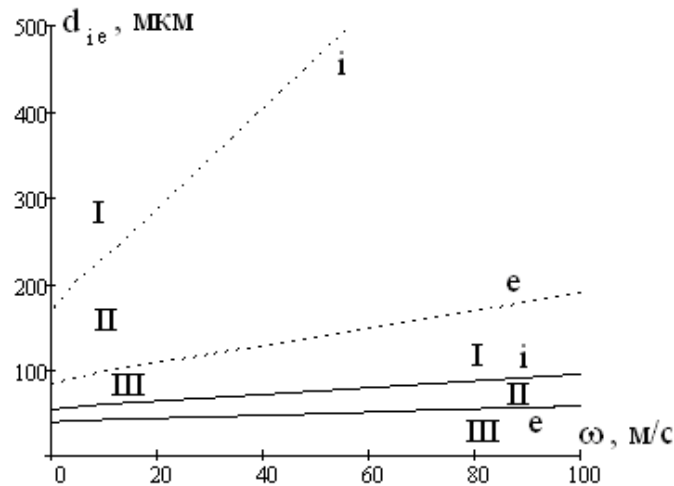


Рисунок 5 – Зависимости критических диаметров воспламенения и погасания частицы от скорости ее движения в воздухе при температурах: сплошная – $T_g = T_w = 1400$ К, пунктирная – $T_g = T_w = 1200$ К

С увеличением относительной скорости частицы эти критические значения увеличиваются.

На зависимости $d_{i,e}(\omega)$ выделяют три области параметров скорости и диаметра частицы. Область III соответствует диапазонам значений диаметров выше d_e и скоростей ниже ω_e . Область III определяет низкотемпературные состояния, где частица самопроизвольно не воспламеняется. В области I ($d > d_i$, $\omega < \omega_i$) осуществляется переход на высокотемпературный режим при любом значении начальной температуры. В областях II ($d_e < d < d_i$, $\omega_i < \omega < \omega_e$) наблюдается гистерезисный характер теплообмена. Внутри гистерезисных петель переход на высокотемпературный режим возможен при начальной температуре большей критического значения.

При увеличении температур газа и стенок происходит уменьшение критических значений диаметра d_i и d_e . Область II сужается, и при некотором значении температуры газа происходит вырождение критических условий.

Выводы. Показано, что при невысоких температурах, меньших 1500 К (диффузионно-кинетическое отношение меньше единицы), скорость химических реакций частицы углерода с воздухом практически не зависит от скорости обдува. В области больших температур (диффузионно-кинетическое отношение больше единицы) с ростом скорости обдува увеличивается скорость реакции.

Установлены закономерности влияния температуры нагретого воздуха и скорости обдува на диаметры воспламенения и погасания, а также на температуру и скорость горения углеродной частицы. Рост температуры воздуха при постоянных скоростях

обдува приводит к уменьшению диаметра воспламенения в большей степени, чем диаметра погасания углеродной частицы. Это объясняется тем, что воспламенение происходит в кинетической области, а погасание углеродной частицы в переходной области. Показано, с ростом скорости обдува при постоянной температуре воздуха происходит увеличение диаметров воспламенения и погасания с разной скоростью, однако повышение температуры воздуха приводит к уменьшению этих скоростей.

Проведенный анализ зависимости температуры и скорости горения от скорости обдува показал, что горение частицы углерода протекает в области, близкой к диффузионной. Поэтому наблюдается только слабое увеличение температуры и скорости горения с ростом скорости обдува.

Дальнейшие исследования направлены на установление влияния скорости движения частицы на температуру и скорость горения, критические условия зажигания в условиях комнатных температур для пористых углеродных частиц.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калинин В. В. Влияние диаметра и температуры пористых углеродных частиц на высокотемпературную кинетику образования оксида углерода и углекислого газа / В. В. Калинин, Ю. А. Зинченко, А. С. Черненко, Р. Д. Куземко // Физика аэродисперсных систем. – 2013. – № 50. – С. 69-85.
2. Основы практической теории горения : учебное пособие для вузов // В. В. Померанцев. – Л. : Энергоатомиздат, Ленинградское отд-ние, 1986. – 312 с.
3. Кирьянов Д. В. Mathcad 15 / Mathcad Prime 1.0. – СПб. : БХВ-Петербург, 2012. – 432 с.
4. Хитрин Л. М. Физика горения и взрыва / Л. М. Хитрин. – М. : Издательство Московского университета. – 1957. – 442 с.
5. Калинин В. В. Влияние излучения на критические режимы тепло- и массообмена при параллельных реакциях на поверхности частицы // Физика горения и взрыва. – 1994. – Т. 30, № 4. – С. 63-74.
6. Калинин В. В. Горение и самопроизвольное погасание пористых углеродных частиц в азотно-кислородных смесях комнатной температуры / В. В. Калинин, А. С. Черненко // Физика горения и взрыва. – 2013. – Т. 49, № 2. – С. 80-88.

REFERENCES

1. Kalinchak V. V. Vliyanie diametra i temperaturih poristikh uglerodnikh chastic na vihsokotemperaturnuyu kinetiku obrazovaniya oksida ugleroda i uglekislogo gaza / V. V. Kalinchak, Yu. A. Zinchenko, A. S. Chernenko, R. D. Kuzemko // Fizika aehrodispersnikh sistem. – 2013. – № 50. – S. 69-85.
2. Osnovih prakticheskoyj teorii goreniya : uchebnoe posobie dlya vuzov // V. V. Pomerancev. – L. : Ehnergoatomizdat, Leningradskoe otd-nie, 1986. – 312 s.
3. Kirjyanov D. V. Mathcad 15/Mathcad Prime 1.0. – SPb. : BKhV-Peterburg, 2012. – 432 s.
4. Khitrin L. M. Fizika goreniya i vzrihva / L. M. Khitrin. – M. : Izdatelstvo Moskovskogo universiteta. – 1957. – 442 s.
5. Kalinchak V. V. Vliyanie izlucheniya na kriticheskie rezhimih teplo- i massoobmena pri paralleljnihkh reakciyakh na poverkhnosti chasticih // Fizika goreniya i vzrihva. – 1994. – T. 30, № 4. – S. 63-74.
6. Kalinchak V. V. Gorenje i samoproizvoljnoe pogasanie poristikh uglerodnikh chastic v azotno-kislorodnikh smesyakh komnatnoj temperaturih / V. V. Kalinchak, A. S. Chernenko // Fizika goreniya i vzrihva. – 2013. – T. 49, № 2. – S. 80-88.

Селіванов С.Є., Тригуб С.М., Калінчак В.В., Черненко О.С. ВПЛИВ РІЗНИХ ФАКТОРІВ НА ШВИДКІСТЬ ХІМІЧНИХ РЕАКЦІЙ ВУГЛЕЦЮ З ПОВІТРЯМ У ПРОЦЕСІ ГОРІННЯ

Робота присвячена актуальній проблемі – профілактиці пожежної небезпеки на судні, пов'язаної з дослідженням впливу різних факторів: температури навколишнього повітря, швидкості обдуву повітрям, діаметра частки, відносної швидкості руху частки в повітрі на сумарну швидкість хімічних реакцій вуглецю з газами, що дає можливість змінювати характеристики горіння, а при оптимальних умовах дає можливість регулювати процес горіння й тим самим забезпечити судно від пожежі, що обумовило мету роботи. Відповідно до поставленої мети в роботі розглянута реакційна здатність вуглецевої частки й побудована залежність швидкості хімічної реакції від температури при різних швидкостях обдуву вуглецевої частки різного діаметра, проведений аналіз впливу швидкості обдуву на критичні температури й діаметри запалення й загасання. Показане, що при невисоких температурах, менших 1500 К (дифузійно-кінетичне відношення менше одиниці), швидкість хімічних реакцій частки вуглецю з повітрям практично не залежить від швидкості обдуву. В області більших температур (дифузійно-кінетичне відношення більше одиниці) з ростом швидкості обдува збільшується швидкість реакції. Установлені закономірності впливу температури нагрітого повітря й швидкості обдуву на діаметри запалення й згасання, а також на температуру й швидкість горіння вуглецевої частки.

Ключові слова: профілактика, пожежна небезпека, вуглецева частка, швидкість хімічної реакції, температура, діаметр частки, швидкість обдуву повітря, відносна швидкість руху вуглецевої частки, горіння, запалення, згасання.

Selivanov S.E., Trigub S.N., Kalinchak V.V., Chernenko A.S. INFLUENCE OF VARIOUS FACTORS ON SPEED CHEMICAL REACTIONS OF CARBON WITH AIR IN THE COURSE OF BURNING

Work is devoted an actual problem – preventive maintenance of fire danger on a vessel connected with Research of influence of various factors: temperatures of air, speed обдува Air, diameter of a particle, relative speed of movement of a particle in air on the total Speed of chemical reactions of carbon with gases that gives the chance to change characteristics of burning, And under optimum conditions gives the chance to regulate burning process and by that to secure Vessel from a fire that has caused the work purpose. According to an object in view in work Reactionary ability of a carbon particle is considered and dependence of speed chemical is constructed Reactions from temperature at different speeds обдува a carbon particle of different diameter, it is spent The analysis of influence of speed on temperature of burning of a particle at its various sizes, it is investigated Influence of speed обдува on critical temperatures and diameters of ignition and загасання. It is shown, That at low temperatures, smaller 1500 K (the diffuzionno-kinetic relation is less Units), speed of chemical reactions of a particle of carbon with air practically does not depend on speed обдува. In the field of the big temperatures (the diffuzionno-kinetic relation is more than unit), with Growth of speed обдува speed of reaction increases. Laws of influence are established Temperatures нагрітого air and speed обдува for diameters of ignition and загасання, and also on Temperature and speed of burning of a carbon particle.

Keywords: preventive maintenance, fire danger, a carbon particle, speed of chemical reaction, Temperature, diameter of a particle, speed обдува air, relative speed of movement of the carbon Particles, burning, ignition.

© Селіванов С.Є., Тригуб С.М., Калінчак В.В., Черненко О.С.

Статтю прийнято
до редакції 24.05.15