

УДК 536.4

Калинчак В. В., Черненко А. С., Федоренко А. В., Розизнаний М. В.

Одесский национальный университет имени И.И. Мечникова, кафедра общей физики и физики теплоэнергетических и химических процессов, Одесса, Дворянская, 2, 65082

Время задержки каталитического гетерогенного воспламенения газов на частицах катализатора различного размера

В работе аналитически определяется время задержки каталитического воспламенения малых примесей горючего газа в воздухе на сферической металлической частице различного диаметра на примере беспламенного горения газоздушных смесей с примесями водорода на частице платины. Показано, что устойчивое беспламенное горение наблюдается спустя период индукции для частиц определенного диапазона. Установлено, что время каталитического воспламенения газов разделено на три стадии: 1. инертный разогрев, длительность которого все таки зависит от концентрации горючего газа; 2. стадия самоускорения и повышения температуры катализатора при протекании каталитической реакции в переходной области; 3. стадия диффузионного торможения и выхода на устойчивое каталитическое горение. При анализе времен в безразмерной форме использовалось характерное время релаксации. Для определения длительности второй стадии применяется измененный подход Франк-Каменецкого. Длительность стадии диффузионного торможения в безразмерной форме практически не зависит от диаметра частицы катализатора, хотя температура каталитического горения убывает с ростом диаметра катализатора. Теплообмен излучением, роль которого возрастает с ростом размера катализатора, входит в эффективный коэффициент теплообмена, что позволяет сохранить идеологию классического подхода к решению задачи о периоде индукции.

Ключевые слова: платиновая частица, диаметр, водород, период индукции, самовоспламенение, теплообмен излучением, поверхностное (беспламенное) горение.

Введение. Использование гистерезисных режимов катализаторов окисления (беспламенного горения) из металлов платиновой группы в виде тонких проволок или частиц является актуальной задачей для термохимических газоанализаторов, термографических приборов для исследования механизма и определения кинетических характеристик каталитического окисления газов, реакторов для очистки выхлопных газов от несгоревших углеводородов и угарного газа.

Время воспламенения или период индукции является важной характеристикой беспламенного горения газоздушных смесей с примесью горючего газа на частице (нити) катализатора. [1-2]. Для определения периода индукции гетерогенных систем существует несколько подходов.

Так, например, при анализе временной зависимости температуры частицы кокса в общем случае можно наблюдать две точки перегиба до наступления квазистационарного горения [3-5], что позволяет использовать их для разбиения периода индукции на две стадии: 1) время инертного прогрева (до первой точки перегиба); 2) время химического разогрева (до второй точки перегиба).

Для аналитического поиска периода индукции использовался критический теплоотвод воспламенения.

Период индукции стремится к бесконечности при увеличении и приближении скорости теплоотвода (уменьшения диаметра частицы и температуры газовой воздушного потока) к критическому значению. Для приближенной оценки периода индукции определяют время достижения бесконечно большой температуры при протекании одной химической реакции в кинетической области. Это позволило определить период индукции в виде [4, 6]:

$$\tau_2 \approx \tau_{ch1} \frac{2\pi}{e} \left[1 - \frac{\alpha_*}{\alpha_{*i}} \right]^{-\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

$$\tau_{ch1} = \frac{c_c \rho_c d R T_g^2 / E}{6 Y_{\infty} \rho_g Q_f k(T_g)}, \quad \alpha_* = \frac{\alpha R T_g^2}{E_1 Q_1 k_1(T_g) Y_{O_2} \rho_g}, \quad \alpha_{*i} = e.$$

На практике под периодом индукции понимают время, когда яркость частицы катализатора перестает меняться, или время протекания процесса от начала разогрева частицы до момента появления внешних признаков реакции горения [3]. В этом случае при его аналитическом определении необходимо вводить дополнительно третью стадию периода индукции, для которой характерно протекание химической реакции в диффузионной области [4, С.70-73].

Критерием, который определяет режим горения (кинетический, диффузионный, переходной), является диффузионно-кинетическое отношение, представляющего отношение скорости химической реакции к скорости массопереноса или отношение времени диффузии τ_D и времени химической реакции на поверхности частицы τ_{ch} :

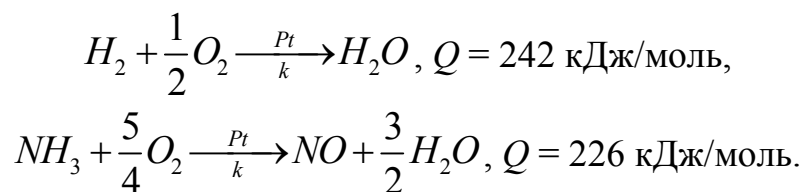
$$Se = \frac{k}{\beta} = \frac{dk}{D Nu} = \frac{\tau_D}{\tau_{ch}}.$$

Обычно принято считать, что устойчивое беспламенное горение на частице происходит в диффузионном режиме ($Se \gg 1$), воспламенение в кинетической области ($Se \ll 1$) [2]. В процессе воспламенения возможна переходная область реагирования ($Se \approx 1$). Для угольной частицы диаметром 100-1000 мкм в режиме горения $Se = 4 \div 10$ и для аналитического определения времени воспламенения необходимо учитывать массоперенос кислорода [5]. В случае же беспламенного каталитического горения газов на 100 мкм платиновом катализаторе $Se > 10^4$ [7]. Поэтому часть времени воспламенения при протекании реакции в переходной области крайне мало.

Одним из важных параметров, от которых зависит период индукции, является размер частицы. Поэтому целью данной работы стало определение времени задержки гетерогенного каталитического воспламенения газозвудушных смесей с примесями горючего газа в зависимости от размера дисперсного катализатора.

Постановка задачи. В качестве наиболее общего случая гетерогенной каталитической реакции первого порядка выбрана реакция окисления примеси

водорода или аммиака с кислородом воздуха на поверхности платиновой частицы (нити):



Зависимость от времени средней по всему объему температуры частицы катализатора [7] находится из решения уравнения термодинамики:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{6}{c_c \rho_c d} \cdot q_{eff}, \quad T(t=0) = T_b, \quad (2)$$

$$q_{eff} = q_{ch} - q_h, \quad q_{ch} = Q_f k \rho_{gs} Y_{fs}, \quad Y_{fs} = Y_f \frac{1 + \psi_{td}}{1 + Se}, \quad q_h = \alpha(T - T_g) + \varepsilon \sigma (T - T_w^4),$$

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{T_E}{T}\right), \quad Se = \frac{k}{D_f Sh} d, \quad T_E = \frac{E}{R},$$

где Q_f – тепловой эффект реакции, Дж/кг H_2 ; k – константа скорости химической реакции; Y_{fs} – массовая доля горючего газа у поверхности частицы; ρ_c , c_c – плотность и удельная теплоемкость частицы катализатора, Дж/(кг·К); D_f – коэффициент диффузии горючего газа, м²/с; T , T_g , T_w – температуры поверхности частицы, окружающего газа и окружающих тел, К; ε – коэффициент черноты частицы; σ – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м²К⁴).

Для нити катализатора, по которому протекает электрический ток, вводится понятие **эффективной температуры газовой смеси**. Эта температура, до которой нагрелся бы инертный проводник с током в отсутствие теплотерь излучением в среде с температурой T_{g0} :

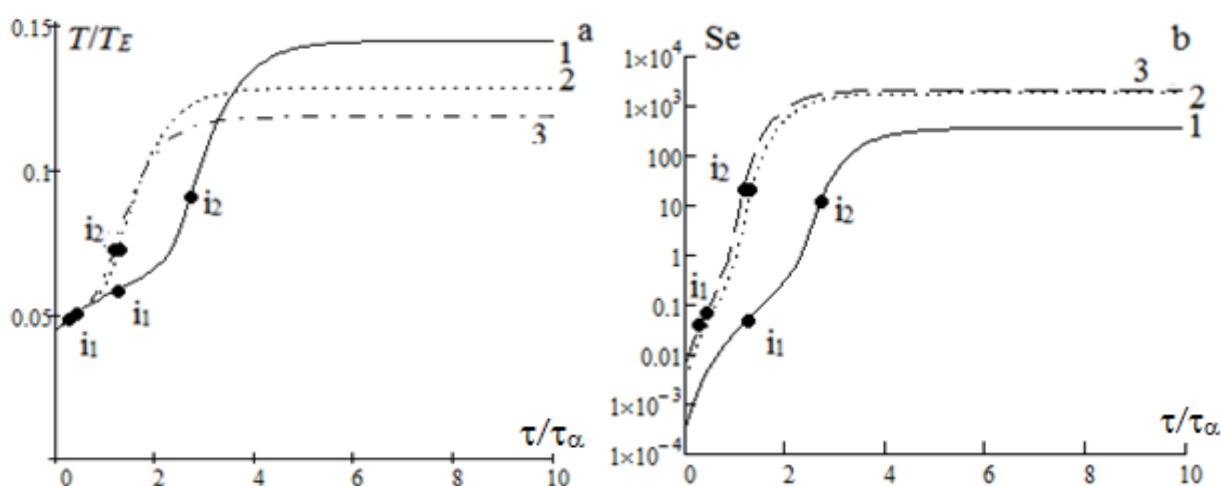


Рис. 1. Временные зависимости температуры платиновой частицы и диффузионно-кинетического отношения при каталитическом окислении примеси водорода $Y_f = 0.19\%$ в воздухе. Диаметр частицы: 1) 400 мкм, 2) 2000 мкм, 3) 8000 мкм. Температура газовой смеси $T_g = 420$ К. Температура окружающих удаленных тел $T_w = 293$ К. $Sh = 2$.

$$T_g = T_{g0} + A_I \left(\frac{2I}{\pi d} \right)^2, \quad A_I = \frac{\eta}{Sh_0 D_f \rho_g c_{pg} Le^{-1+m}}, \quad Sh_0 = 0.5.$$

Рассмотрим динамику изменения температуры частицы катализатора (рис. 1а). В качестве примера взята частица платины, помещенной в нагретый поток газовой смеси с примесью горючего газа. Точки i_1 и i_2 соответствуют точкам перегиба на временной зависимости температуры катализатора. Точка i_1 лежит в области диффузионно-кинетических отношений $Se < 0.1$ (рис. 1б), а точка i_2 – в области $Se > 10$.

Эти точки могут служить для разделения суммарного времени задержки воспламенения на три стадии:

- 1) стадия инертного разогрева. Прогрев частицы осуществляется преимущественно за счет теплообмена с газом и тепловым излучением с окружающими телами;
- 2) стадия самоускорения и повышения температуры катализатора при протекании каталитической реакции в кинетической и переходной области;
- 3) стадия диффузионного торможения и выхода на устойчивое каталитическое горение.

Аналитическое определение периода индукций. Для определения длительности отдельных стадий периода индукции необходимо определить критические условия высокотемпературного теплообмена, которые одновременно удовлетворяют двум условиям [4]:

$$q_{eff} = 0 \quad \text{и} \quad \left. \frac{\partial q_{eff}}{\partial T} \right|_{i,e} = 0.$$

Наиболее простой приближенный путь определения критических условий самовоспламенения горючего газа на частице основан на включении теплового излучения в эффективный закон Ньютона-Рихмана:

$$\alpha(T - T_g) + \varepsilon\sigma(T^4 - T_w^4) \approx \alpha_{eff}(T - T_{g,eff}),$$

где вводятся эффективные коэффициент теплоотдачи и температура газовой смеси:

$$\alpha_{eff} = \alpha + 4\varepsilon\sigma T_g^3, \quad T_{g,eff} = T_g - \frac{\varepsilon\sigma(T_g^4 - T_w^4)}{\alpha + 4\varepsilon\sigma T_g^3}.$$

Применив указанные критические условия, получим критические значения температуры катализатора и коэффициента теплоотдачи:

$$T_i = T_{g,eff} + \frac{RT_i^2}{E} \approx T_{g,eff} + \frac{RT_{g,eff}^2}{E} \quad \text{и} \quad \alpha_i = \frac{\alpha_{eff,i} RT_i^2}{EQk_0 Y_f \rho_g} \exp\left(\frac{E}{RT_i}\right) = 1. \quad (3)$$

В отличие от подхода Франк-Каменецкого, когда, используя разложение экспоненты Аррениуса, вводится безразмерный коэффициент теплообмена при температуре газовой смеси, в нашем случае в качестве безразмерного коэффициента теплоотдачи используем комплекс (3).

Для определения периода индукции введем безразмерные время, температуру и коэффициент теплоотдачи:

$$\tilde{\tau} = \frac{\tau}{\tau_\alpha}, \quad \tau_\alpha = \frac{c\rho d}{6\alpha_{eff}}, \quad \theta = \frac{T - T_i}{RT_i^2} E, \quad \tilde{\alpha} = \frac{\alpha_{eff} RT_i^2}{EQk_0 Y_f \rho_g} \exp\left(\frac{E}{RT_i}\right).$$

Разложение экспоненты Аррениуса вблизи температуры самовоспламенения можно представить как: $k \approx k(T_i) \cdot e^\theta$. В этом случае уравнение для изменения температуры частицы катализатора и протекании химической реакции в кинетической области примет вид:

$$\alpha_i \frac{\partial \theta}{\partial \tilde{\tau}} = e^\theta - \tilde{\alpha}(\theta + 1), \quad \theta(\tilde{\tau} = 0) = \theta_b. \quad (4)$$

Данное уравнение является основным для нахождения длительности первых двух стадий.

Применив $\frac{\partial \theta}{\partial \tilde{\tau}} = 0$ и $\left. \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\partial \theta}{\partial \tilde{\tau}} \right) \right|_i = 0$, получим критические условия самовоспламенения $\theta_i = 0$ и $\tilde{\alpha}|_i = \alpha_i = 1$, аналогичные (3).

Стадия инертного прогрева. На этом временном участке используется предположение о малости химического тепловыделения, которым пренебрегают в (4). Время инертного прогрева определяется моментом достижения температуры, отстоящей на единичный характерный интервал от температуры соответствующей точке перегиба $\theta_1 = \ln \tilde{\alpha}$ [5]:

$$\tau_1 \approx \tilde{\alpha} \tau_\alpha \int_{\theta_b}^{\ln \tilde{\alpha} - 1} \frac{d\theta}{-\tilde{\alpha}(\theta + 1)} = \tau_\alpha \ln\left(\frac{\theta_b + 1}{\ln \tilde{\alpha}}\right). \quad (5)$$

Длительность стадии слабо зависит от концентрации кислорода, т.к. она определяет момент, когда вклад химической реакции, протекающей в кинетической области, становится заметным.

Вторая стадия. Длительность данной стадии каталитического воспламенения на частице катализатора определяется в предположении кинетического режима реакции окисления как

$$\tau_2 \approx \tilde{\alpha} \tau_\alpha \int_{\ln \tilde{\alpha} - 1}^{\infty} \frac{d\theta}{e^\theta - \tilde{\alpha}(\theta + 1)}. \quad (6)$$

Температура катализатора постепенно возрастает и переходит через температуру воспламенения T_i . Поэтому примем малость безразмерной температуры. Безразмерный коэффициент теплоотдачи в данном случае разлагать не нужно, как это делается в классическом случае [6, 7].

В этом случае интеграл (6) примет вид:

$$\tau_2 = \tau_\alpha \tilde{\alpha} \int_{\ln \tilde{\alpha} - 1}^{\infty} \frac{2d\theta}{\theta^2 + 2\theta + 2 - 2\tilde{\alpha}(\theta + 1)} = \tau_\alpha \tilde{\alpha} \int_{\ln \tilde{\alpha} - 1}^{\infty} \frac{2d\theta}{\theta^2 + 2(1 - \tilde{\alpha})\theta + 2(1 - \tilde{\alpha})}.$$

Нижний предел интегрирования без существенных погрешностей можно заменить на $-\infty$. В результате получим окончательное выражение для длительности второй стадии времени каталитического самовоспламенения.

$$\tau_2 = \tau_\alpha \frac{2\pi\tilde{\alpha}}{\sqrt{1-\tilde{\alpha}^2}}. \quad (7)$$

На **третьей стадии** диффузионно-кинетическое отношение значительно больше единицы (рис.1b), то есть химическая реакция протекает в диффузионной области. На данной стадии вблизи второй точки перегиба i_2 наблюдается относительно высокая скорость увеличения температуры катализатора. Далее за счет диффузионного торможения температура плавно приближается к устойчивому стационарному значению при каталитическом горении. Уравнение для определения длительности этой стадии можно представить в виде:

$$\frac{V_c}{S_c} c_c \rho_c \frac{\partial T}{\partial t} = Q_f k \rho_{gs} Y_f (1 + \psi_{id}) \frac{1}{Se} - \alpha_{eff} (T - T_{g,eff}).$$

Учитывая, что $\alpha = \beta c_g \rho_g L e^{-1+m}$ и, введя $T_Q = \frac{Q_f Y_f}{c_g} (1 + \psi_{id}) L e^{1-m}$, данное уравнение приводится к виду:

$$t_\alpha \frac{\partial T}{\partial t} = \left(T_Q \frac{\alpha}{\alpha_{eff}} - T + T_{g,eff} \right).$$

Нижний предел выбран как $\theta_2 = 5$ или $T_2 = T_g + 5RT_g^2 / E$, а верхний соответствует температуре, которая отличается от температуры горения на малую величину $T_{f3} = (1 - \delta) T_{bur}$, где $T_{bur} = T_Q \frac{\alpha}{\alpha_{eff}} + T_{g,eff}$. Для дальнейших расчетов выбрано $\delta = 0.01$. Согласно последней формулы температура каталитического горения убывает с ростом диаметра катализатора.

В результате длительность третьей стадии зависит от точности задания верхней границы интегрирования:

$$\tau_3 = \tau_\alpha \ln \left(\frac{T_{bur} - T_2}{T_{bur}} \frac{1}{\delta} \right). \quad (8)$$

Сумма полученных трех времен и является общей длительностью каталитического самовоспламенения газов на частице катализатора: $\tau_{ind} = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3$.

Расчеты для каталитического горения водорода на платине ($\varepsilon = 0.15$) проводились при следующих значениях параметров: $E = 55$ кДж/моль, $k_0 = 0.8 \cdot 10^6$ м/с, $Q_f = 120.9$ МДж/кг H_2 , $D_0 = 0.6 \cdot 10^{-4}$ м²/с, $m = 0.33$, $n = 1.82$. Для каталитического окисления аммиака на платине принималось: $E_1 = 139$ кДж/моль, $k_{01} = 13 \cdot 10^{13}$ м/с, $Q_{f1} = 13.3$ МДж/кг NH_3 , $D_0 = 0.2 \cdot 10^{-4}$ м²/с. Отличием этих двух горючих газов является отличие энергий активаций реакции и коэффициентов диффузии в воздухе практически в 3 раза.

Анализ результатов. На рис. 2 представлены зависимости длительности отдельных стадий от размера катализатора при каталитическом окислении водорода. Так с возрастанием размера катализатора длительность каждой стадии, естественно возрастает (рис.2а). Наиболее интересным является динамика из-

менения отношения этих времен к времени релаксации τ_α (рис.2b). Так для малых частиц время самовоспламенения определяется длительностью стадии самоускорения при протекании химической реакции в кинетической области (рис. 2b). Для крупных частиц период индукции определяется длительностью стадии диффузионного торможения, для которой характерно практически независимость от диаметра отношения τ_3/τ_α .

Особенностью данной зависимости является наличие ограниченной области диаметров, для которых возможно каталитическое самовоспламенение. Так, в области меньших диаметров предел самовоспламенения связан с возрастанием теплоотдачи выше критического значения (рис. 2с).

В области крупных размеров предел связан с возрастанием стадии диффузионного торможения, несмотря на то, что анализ формулы (7) показывает на

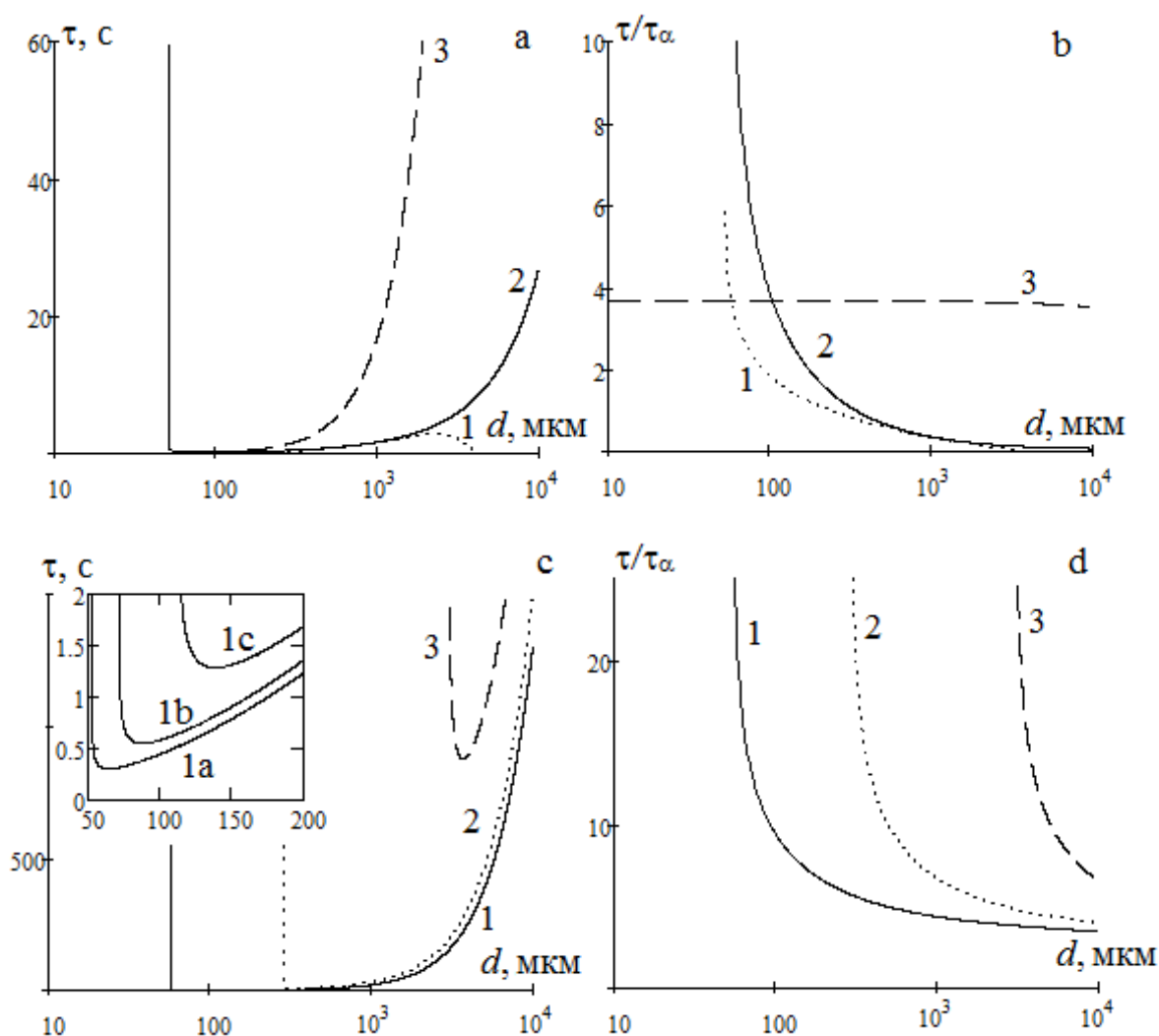


Рис. 2. Зависимость времени каталитического воспламенения **водорода** от диаметра платиновой частицы ($Sh = 2$).

a, b) 1 – τ_1 ; 2 – τ_2 ; 3 – τ_3 . Температура газовой смеси $T_g = 420$ К, доля водорода $Y_f = 0.19\%$.

с, d) суммарное время каталитического самовоспламенения. Температура смеси: 1 – $T_g = 420$ К, 2 – $T_g = 370$ К, 3 – $T_g = 320$ К. Доля водорода $Y_f = 0.19\%$. На вкладке: температура смеси $T_g = 420$ К, доля водорода Y_f : 1a) 0.19%, 1b) 0.14%, 1c) 0.09%.

наличие верхнего предела по размеру, связанного с возникновением критического значения коэффициента теплообмена при учете теплообмена излучением.

На исследуемой зависимости наблюдается минимум. Диаметр катализатора, соответствующий ему, достаточно близок к нижнему пределу области самовоспламенения по диаметру. С уменьшением концентрации горючего газа и температуры газовой смеси нижний предельный диаметр возрастает, как и период индукции в точке минимума (рис. 2с). Верхний предельный диаметр малочувствительный к доли горючего газа.

В тоже время с ростом диаметра катализатора отношение τ_{ind}/τ_a асимптотически приближается к τ_3/τ_a .

На рис. 3 представлены аналогичные кривые для случая каталитического самовоспламенения аммиака на платиновой частице. При высоких температурах смеси ($T_g > 450$ К) период индукции каталитического самовоспламенения и

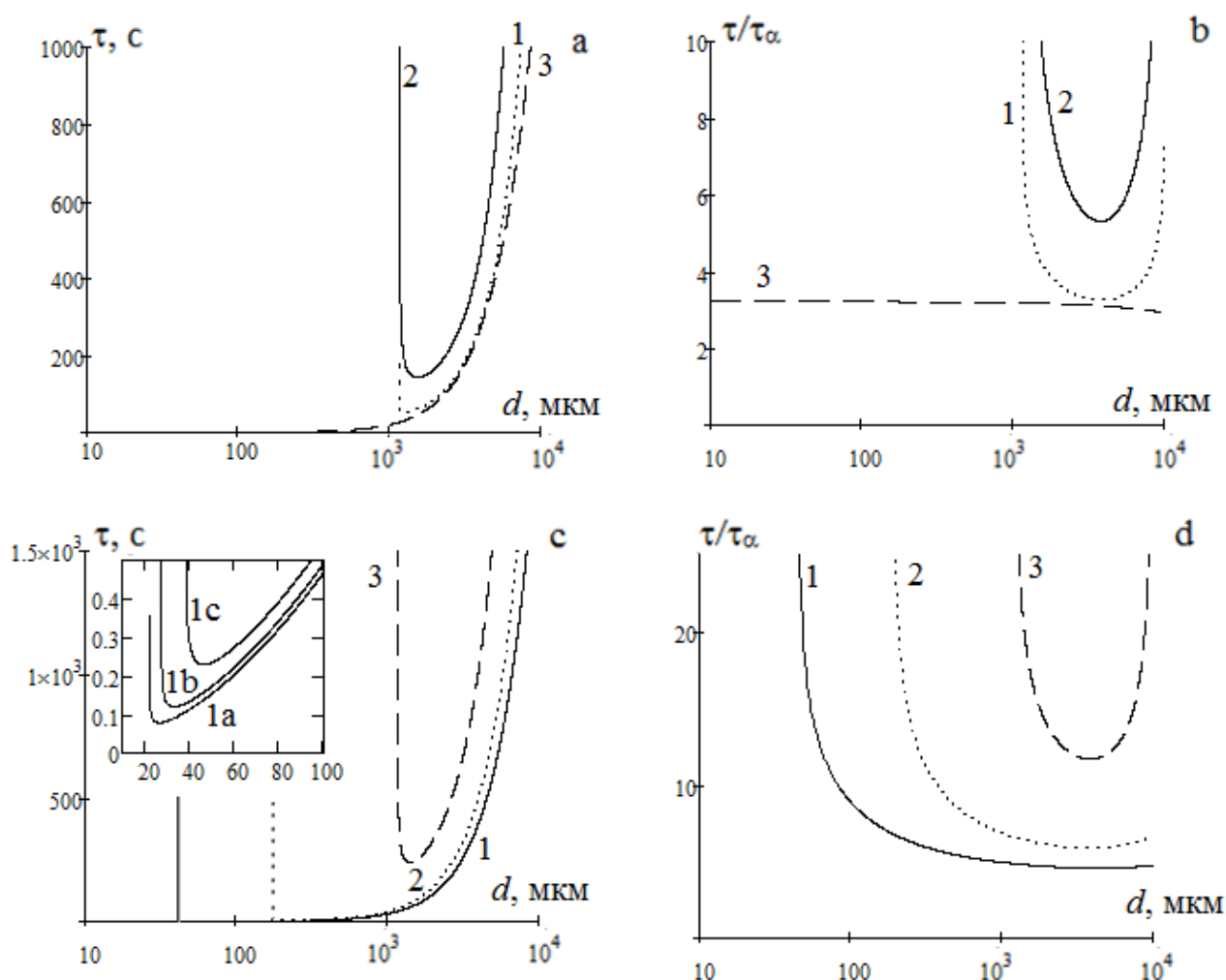


Рис. 3. Зависимость времени каталитического воспламенения аммиака от диаметра катализатора ($Sh = 2$).

a, b) 1 – τ_1 ; 2 – τ_2 ; 3 – τ_3 . Температура газовой смеси $T_g = 433$ К, доля аммиака $Y_f = 1.8\%$.

с, d) суммарное время каталитического самовоспламенения. Температура смеси: 1 – $T_g = 473$ К, 2 – $T_g = 453$ К, 3 – $T_g = 433$ К. Доля аммиака $Y_f = 1.8\%$. На вкладке: температура смеси $T_g = 420$ К, доля водорода Y_f : 1a) 3.1%, 1b) 2.4%, 1c) 1.8%.

длительности отдельных стадий с ростом диаметра ведут себя аналогичным образом (рис.3 с, d). В этих случаях при высоких размерах частицы катализатора (более 2 мм) основная часть времени самовоспламенения составляет время диффузионного торможения, возрастание которого и определяет «верхний» предел каталитического самовоспламенения по диаметру катализатора.

Для более низких температур газовой смеси (рис.3, a,b) основной стадией становится стадия самоускорения (вторая стадия). Как видно из формулы (7) неопределенность возникает при выполнении условия $\alpha_i = 1$. За счет включения через эффективные величины в этот безразмерный комплекс теплообмена излучением, это условие может выполняться при двух диаметрах. Меньший диаметр определяет нижний предел каталитического самовоспламенения и связан с возрастанием теплообмена молекулярно-конвективным путем. Большой диаметр определяет верхний предел каталитического самовоспламенения и связан с возрастанием теплообмена излучением.

При понижении температуры смеси верхний предел области каталитического самовоспламенения по диаметру понижается до миллиметровых размеров и комплекс $\alpha_i \rightarrow 1$, что и объясняет относительный рост длительности стадии самоускорения.

Выводы. В результате анализа характерных точек на временной зависимости температуры частицы катализатора было показано, что все время каталитического самовоспламенения можно разбить на три стадии: стадию инертного разогрева, стадия самоускорения при протекании реакции в кинетической области и стадию диффузионного торможения. При аналитическом определении длительностей стадий предлагается в качестве характерной температуры использовать температуру самовоспламенения, а не температуру газа, как в классических работах. Предложены аналитические выражения для оценки длительности этих стадий.

Показано, что разогрев газовой смеси на 50-150 °С приводит к каталитическому самовоспламенению малых примесей горючего газа на частицах катализатора. Нижний предел области самовоспламенения по диаметру катализатора возрастает с уменьшением доли горючего газа в смеси и температуры смеси. Причем уменьшение температуры смеси всего на 100 °С увеличивает предельный размер в более, чем в 10 раз.

Для частиц более 400 мкм время самовоспламенения в основном определяется временем диффузионного торможения.

Исключением является температуры газовой смеси близкие к температуре самовоспламенения для данного диаметра катализатора и концентрации горючего газа в смеси. В этом случае основной стадией становится стадия разогрева дисперсного катализатора в кинетической области.

ЛИТЕРАТУРА:

1. *Becker, M. Schiemann, S. Heuer, N. Vorobiev, V. Scherer, D. Haxter, et al., A Standardized Method For The Characterization of Coal Ignition Under Oxyfuel*

- Conditions, in: 32nd Pittsburgh Coal Conf., Pittsburgh, PA, 2015: PP. 1–12. doi:10.13140/RG.2.1.1177.2883.
2. Основы практической теории горения / под ред. В. В. Померанцева. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отд-ние, 1986. – 312 с.
 3. Бабий В. И., Куваев Ю.Ф. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. – М., 1986. – 208 с.
 4. Калинин В.В., Черненко А.С. Теплофизика горения пылеугольного топлива. – Одеса. ОНУ им. И. И. Мечникова. – 2017. – 225 с.
 5. Chernenko A.S., Kalinchak V.V., Korchagina M.N., Darakov D.S. Influence of mass transfer on the critical conditions and the time of the coke particle ignition // Ukrainian Journal of Physics. – 2019. – Т.64, № 9. – С.793-802.
 6. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. – М.: Наука, 1987. – 494 с.
 7. Калинин В.В., Черненко О.С. Теплофизика безполум'яного горіння газів (монографія). – Одеса. Астропринт. – 2020. – 200 с.

Калінчак В. В., Черненко О. С., Федоренко А. В., Розізнаний М. В.

Час затримки каталітичного гетерогенного займання газів на частинках каталізатора різного розміру

АНОТАЦІЯ

В роботі аналітично визначається час затримки каталітичного займання малих домішок горючого газу в повітрі на сферичній металевій частинці різного діаметра на прикладі безполум'яного горіння газоповітряних сумішей з домішками водню на частинці платини. Показано, що стійке безполум'яне горіння спостерігається через період індукції для частинок певного діапазону. Встановлено, що час каталітичного займання газів розділений на три стадії: 1. інертний розігрів, тривалість якого все таки залежить від концентрації горючого газу; 2. стадія самоприскорення і підвищення температури каталізатора при протіканні каталітичної реакції в перехідній області; 3. стадія дифузійного гальмування і виходу на стійке каталітичне горіння. При аналізі часів в безрозмірній формі використовувався характерний час релаксації. Для визначення тривалості другої стадії застосовується змінений підхід Франк-Каменецького. Тривалість стадії дифузійного гальмування в безрозмірною формі практично не залежить від діаметра частинки каталізатора, хоча температура каталітичного горіння зменшується з ростом діаметра каталізатора. Теплообмін випромінюванням, роль якого зростає з ростом розміру каталізатора, входить в ефективний коефіцієнт теплообміну, що дозволяє зберегти ідеологію класичного підходу до вирішення завдання про період індукції.

Ключові слова: платинова частка, діаметр, водень, період індукції, самозаймання, теплообмін випромінюванням, поверхневе (безполумене) горіння.

Kalinchak V.V., Chernenko A.S., Fedorenko A.V., Roziznaniy M.V.
Delay time of gases's catalytic heterogeneous ignition on various sizes's catalyst particles

SUMMARY

In this work, catalytic ignition delay time of combustible gas's small impurities in air on a spherical metal particle of various diameters is analytically determined by the example of gas-air mixtures's flameless combustion with hydrogen impurities on a platinum particle. It is shown that stable flameless combustion is observed after an induction period for particles of a certain range. It has been established that catalytic ignition time of gases is divided into three stages: 1. inert heating, the duration of which still depends on the combustible gas concentration; 2. the stage of self-acceleration and catalyst temperature rise during the course of the catalytic reaction in the transition region; 3. stage of diffusion inhibition and reaching stable catalytic combustion. The characteristic relaxation time was used in a dimensionless form. To determine the duration of the second stage, a modified Frank-Kamenetsky approach is applied. The duration of diffusion inhibition stage in the dimensionless form is practically independent of catalyst particle's diameter, although the catalytic combustion temperature decreases with an increase in the catalyst diameter. Heat transfer by radiation, the role of which increases with the growth of the catalyst size, is included in the effective heat transfer coefficient, which allows maintaining the classical ideology to solving the problem of the induction period.

Key words: *platinum particle, diameter, hydrogen, induction period, self-ignition, heat exchange by radiation, surface (flameless) combustion.*