

УДК 536.46

*Калинчак В.В.<sup>1</sup>, Черненко А.С.<sup>1</sup>, Сафронков А.Н.<sup>2</sup>, Калугин В.В.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Одесский национальный университет имени И.И. Мечникова, кафедра теплофизики  
<sup>2</sup>Ополевикий университет, Польша

## **Два предела по диаметру частицы катализатора, определяющих высоко-температурный тепломассообмен с активной газовой смесью**

*С учетом теплопотерь излучением проведен анализ критических, гистерезисных и устойчивых режимов высокотемпературного тепломассообмена, определяющих самовоспламенение, зажигание, самопроизвольное потухание и горение химической реакции на поверхности частицы катализатора в активной газообразной среде, содержащей окислитель, малые добавки горючего и инертное вещество. Нижний предел по диаметру обусловлен молекулярно-конвективным теплообменом между частицей катализатора и окружающим газом. Появление второго предела связано с теплопотерями излучением, причем в критическом условии воспламенения температура частицы меньше за температуру газа. При различных соотношениях температур газа и стенок, окружающие газ, на зависимостях критических значений концентрации активного компонента от диаметра катализатора возможно наличие либо минимумов, либо двух точек вырождения.*

Актуальной проблемой является эффективное использование катализаторов в дисперсном виде, представляющие из себя оксиды металла, например железа, а также металлы переходной группы, в качестве носителей которых являются кремниевые и углеродные частицы. Отметим, что интегральный коэффициент излучательной способности таких частиц очень высокий. Важной теплофизической задачей является выяснение механизмов и определение устойчивых и критических режимов тепломассообмена и кинетики каталитического окисления горючего газообразного вещества на катализаторе в зависимости от концентрации горючего, температуры газовой смеси и размера частиц катализатора. Эта задача в настоящее время является не достаточно решенной, особенно в той части, которая касается выяснения роли теплового излучения и его влияния на пределы, отделяющие области низкотемпературного каталитического окисления от высокотемпературного каталитического горения.

Уравнение для изменения температуры катализатора, на поверхности которой протекает гетерогенная экзотермическая химическая реакция первого порядка с учетом массопереноса горючего компонента, находящегося в газе в недостатке, имеет вид:

$$c_c \rho_c \frac{V_c}{S_c} \frac{\partial T}{\partial t} = q_{eff}, \quad T(t=0) = T_b, \quad (1)$$

$$q_{eff} = q_{ch} - q_g - q_w, \quad q_{ch} = Q_a k \rho_g C_a (1 + Se)^{-1}, \quad q_g = \alpha (T - T_g), \quad q_w = \varepsilon \sigma (T^4 - T_w^4),$$

$$Se = \frac{k}{\beta}, \quad k = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad \alpha = c_g \rho_g \beta Lu^{-1+m}, \quad \beta = \frac{D_g Nu}{d}.$$

В частном случае для нити катализатора, по которой протекает электрический ток с плотностью мощности нагрева  $q_j$ , эффективной температурой газа  $T_g$  является  $T_g = T_{g0} + q_j/\alpha$ , где  $T_{g0}$  – температура газовой смеси.

Здесь  $Q_a$  – тепловой эффект реакции, рассчитанный на килограмм горючего компонента;  $C_a$  – относительная массовая концентрация горючего компонента в воздухе,  $E$  – энергия активации каталитической реакции,  $Se$  – диффузионно-кинетическое отношение, число Семенова,  $Lu$  – число Льюиса,  $T_w$  – температура стенок;  $V_c, S_c$  – объем и площадь поверхности частицы катализатора.

### 1. Определение критических значений концентраций активного компонента и диаметра катализатора без учета теплотерь излучением.

В этом случае условие стационарности можно записать в виде:

$$Q_a C_a k \rho_g \left(1 + \frac{k}{\beta}\right)^{-1} = \alpha (T - T_g).$$

Концентрация активного компонента определяет стационарные значения температуры, используя предыдущее соотношение, согласно уравнению (рис.1):

$$C_a = \left(\frac{\beta}{k} + 1\right) \frac{T - T_g}{Q_a/c_g}. \quad (1)$$

Здесь принято  $Lu = 1$ , т.е.  $\alpha = \beta c_g \rho_g$ .

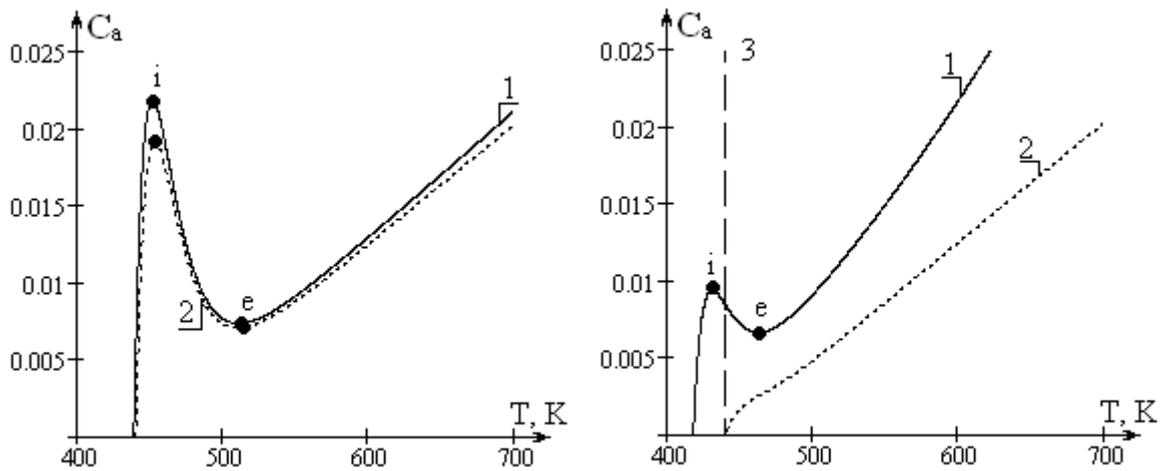
Критические условия воспламенения (т. **и**) и потухания (т. **е**) определяется условием  $\frac{\partial C_a}{\partial T} = 0$  [1], применяя которое получим условие для критического размера катализатора

$$\frac{k}{\beta} = \frac{T - T_g}{RT^2} E - 1 \quad \text{или} \quad \left(\frac{d}{Nu}\right)_{i,e} = \frac{D_g}{k} \left(\frac{T_{i,e} - T_{g,*}}{RT_{i,e}^2} E - 1\right). \quad (2)$$

Подстановка (2) в (1) дает возможность получить критическое значение концентрации активного компонента в зависимости от критической температуры частицы катализатора

$$C_{ai,e} = \frac{c_g (T_{i,e} - T_g)^2}{Q_a} \left(T_{i,e} - T_g - \frac{RT_{i,e}^2}{E}\right)^{-1}. \quad (3)$$

При не учете теплотерь излучением зависимости критических величин имеют классический характер. С ростом диаметра катализатора уменьшается критические значения концентрации, соответствующие воспламенению и потуханию (рис. 2). При некотором диаметре катализатора происходит вырождение критических условий (т. **γ**). Критические температуры, отвечающие беспламенному воспламенению и потуханию газов на поверхности катализатора больше, чем температура нагретого газа, т.е. частица нагревает газ.



**Рис. 1** Зависимости концентрации горючего от стационарной температуры с учетом (кривая 1) и без учета (кривая 2) теплотерь излучением для различных диаметров а)  $d/Nu = 200$  мкм, б)  $d/Nu = 4000$  мкм. Расчет по (4) и (1) при  $T_g = 440$  К,  $T_w = 293$  К. Кривая 3 – температура газа.

Для аналитического определения точки вырождения (т.  $\gamma$ ) (рис. 2а) применим условие  $\frac{\partial C_{ai}}{\partial T} = 0$  к (3) (теплотерь излучением малы в этой точке). В результате получим, что температура катализатора в точке вырождения равна:

$$T_\gamma = \frac{T_g}{1 - 2RT_g/E}.$$

При этом концентрация активного компонента и диаметр катализатора, соответственно, равны:

$$C_{a\gamma} = \frac{4RT_g^2 c_g}{EQ_a} \frac{1}{1 - 4RT_g/E} \text{ и } \left( \frac{d}{Nu} \right)_\gamma = \frac{D_g}{k} (1 - 4RT_g/E).$$

Оценки значений температуры и концентрации активного компонента, проведенные, например, для температур газа 440К и 455К дал для  $T_\gamma$  значения 464К и 482К, а для  $C_{a\gamma} = 0.405\%$  и  $0.434\%$ , соответственно. Это говорит о существенном влиянии температуры газа на критическое значения в точке вырождения.

Расчеты проводились при следующих значениях параметров:  $E = 139$  кДж/моль,  $k_0 = 13 \cdot 10^{13}$  м/с,  $Q_a = 13.3$  МДж/кгNH<sub>3</sub>;  $\rho_g = 0.785$  кг/м<sup>3</sup>,  $c_g = 1030$  Дж/(кг·К),  $\lambda_g = 0.035$  Вт/(м·К),  $D_g = 0.429 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с (свойства воздуха рассчитаны для температуры 450 К и  $D_g = \lambda_g/c_g\rho_g$ ),  $\varepsilon = 0.15$ .

## 2. Определение критических значений концентраций и диаметра катализатора с учетом теплотерь излучением.

С учетом теплотерь излучением условие стационарности запишется в виде

$$Q_a C_a k \rho_g \left( 1 + \frac{k}{\beta} \right)^{-1} = \alpha (T - T_g) + \varepsilon \sigma (T^4 - T_w^4).$$

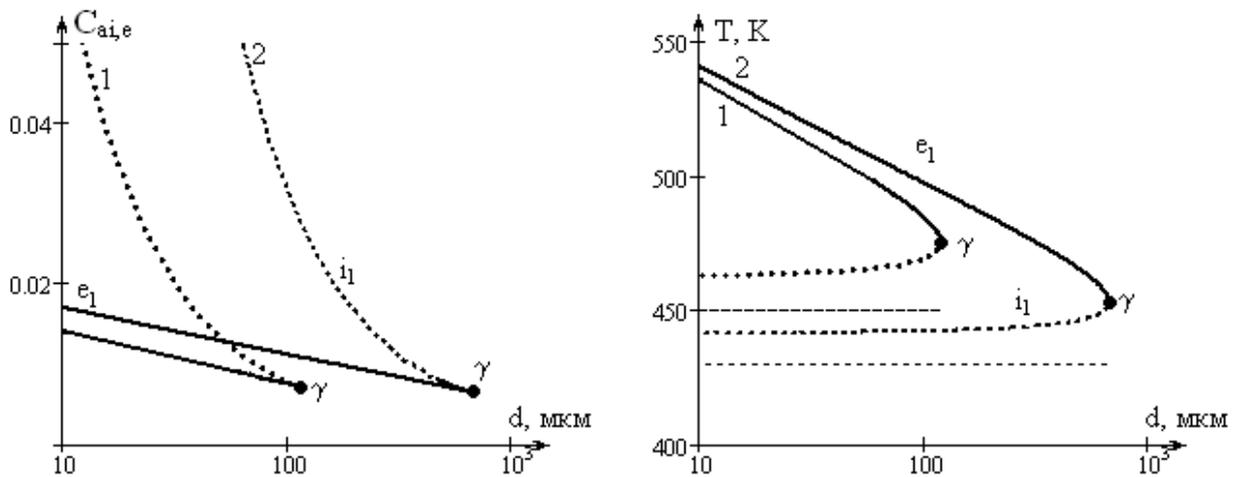


Рис. 2. Зависимость критических значений концентрации горючего (а), температуры (б) катализатора от диаметра частицы при 1)  $T_g = 450$  К, 2)  $T_g = 430$  К без учета теплотерь излучением. Расчет по формулам (2) и (3).

Теплообмен излучением, хотя может быть и мал (для платины  $\varepsilon = 0.15$ ), приводит к качественному изменению зависимости критического значения концентрации от диаметра. Для доказательства используем условие стационарности в виде:

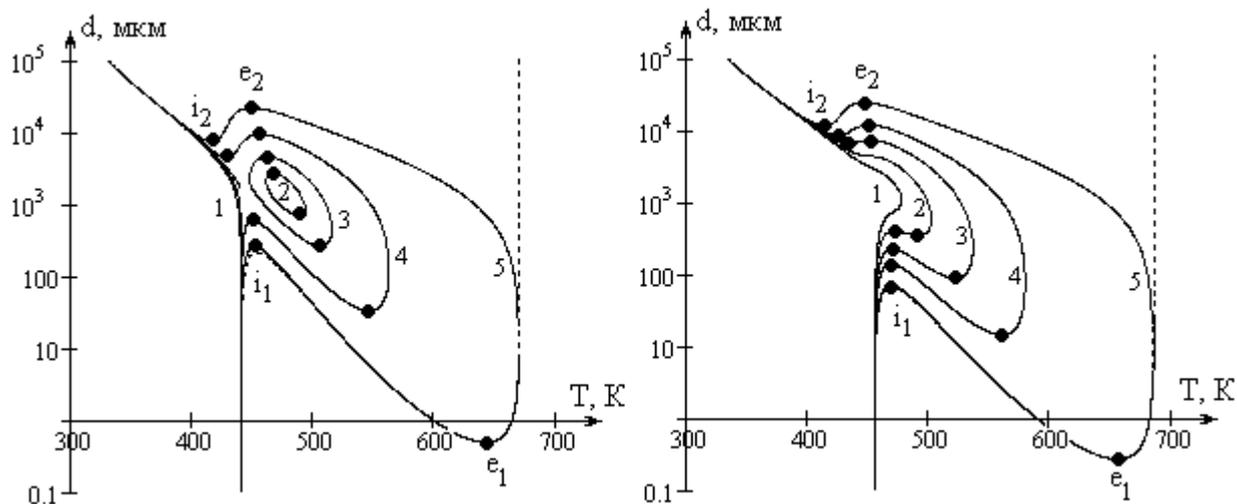
$$C_a = \left( \frac{\beta}{k} + 1 \right) \left( \frac{c_g (T - T_g)}{Q_a} + \frac{\varepsilon \sigma (T^4 - T_w^4)}{Q_a \beta \rho_g} \right). \quad (4)$$

На рис. 1 представлены зависимости концентрации горючего от стационарной температуры с учетом и без учета теплотерь излучением. Для малых размеров частиц катализатора, когда теплотери излучением незначительны по сравнению с теплотерями с газом (рис. 1а), на критические параметры воспламенения и потухания слабо влияют теплотери излучением. В критических точках, соответствующие воспламенению (т.  $i_1$ ), характерно охлаждение катализатора холодным газом ( $T_i > T_g$ ).

Все изменяется при увеличении размера катализатора, когда относительный вклад теплотерь излучением становится существенным (рис. 1б). Учет теплотерь излучением приводит к наличию критических условий воспламенения и потухания, определяющие величину концентрации горючего, выше которой происходит самопроизвольный переход на высокотемпературный режим окисления. В критической точке воспламенения наблюдается нагревание частицы катализатора более нагретым газом ( $T_i < T_g$ ).

Для выяснения влияния теплотерь излучением на области по диаметру, в пределах которых возможно воспламенение или потухание частицы катализатора, проанализируем зависимость диаметра частицы катализатора от стационарной температуры. Данную зависимость нетрудно найти из (4), путем выделения отдельно диаметра через решение квадратного уравнения

$$A_g \left( \frac{\beta}{k} \right)^2 - 2A_0 \frac{\beta}{k} - A_w = 0,$$



**Рис. 3.** Зависимость диаметра частицы от стационарной температуры при различных концентрациях горючего при  $T_w = 300$  К (пунктир –  $q_w = 0$ ):

a)  $T_g = 440$  К: 1)  $C_a = 0.5\%$ , 2)  $C_a = 0.6\%$ , 3)  $C_a = 0.7\%$ , 4)  $C_a = 1.0\%$ , 5)  $C_a = 1.8\%$ .

b)  $T_g = 455$  К: 1)  $C_a = 0.4\%$ , 2)  $C_a = 0.5\%$ , 3)  $C_a = 0.7\%$ , 4)  $C_a = 1.0\%$ , 5)  $C_a = 1.8\%$ .

$$A_w = \frac{\varepsilon\sigma(T^4 - T_w^4)}{Q_a k \rho_g C_a}, \quad A_g = \frac{c_g(T - T_g)}{Q_a C_a}, \quad A_0 = \frac{1}{2}(1 - A_g - A_w).$$

Откуда, для малых размеров катализатора (больших коэффициентов тепло- и массообмена) связь между диаметром и стационарным значением температуры частицы можно описать зависимостью:

$$\frac{d}{Nu} = \frac{\lambda_g}{Q_a k C_a \rho_g} \frac{T - T_g}{A_0 + \sqrt{A_0^2 - A_g A_w}}, \quad (5)$$

а для больших размеров частиц (малых коэффициентов тепло- и массообмена):

$$\frac{d}{Nu} = \frac{\lambda_g Q_a C_a}{c_g} \frac{(A_0^2 + \sqrt{A_0^2 - A_g A_w})}{\varepsilon\sigma(T^4 - T_w^4)}. \quad (6)$$

На рис. 3 представлены зависимости диаметра частицы катализатора от стационарной температуры при различных концентрациях. Критические параметры коэффициентов тепло- и массообмена, характеризующие самопроизвольные переходы на высокотемпературную стадию окисления, определяются условиями:

$$\text{т. } i_1: \frac{\partial q_{eff}}{\partial T} = 0, \quad \frac{\partial d}{\partial T} = 0, \quad \frac{\partial q_{eff}}{\partial d} > 0, \quad \frac{\partial^2 d}{\partial T^2} < 0.$$

$$\text{т. } i_2: \frac{\partial q_{eff}}{\partial T} = 0, \quad \frac{\partial d}{\partial T} = 0, \quad \frac{\partial q_{eff}}{\partial d} < 0, \quad \frac{\partial^2 d}{\partial T^2} > 0.$$

Предельные высокотемпературные состояния тепломассообмена ( $T_e$ ,  $d_e$ ) или условия потухания, определяются условиями:

$$\text{т. } e_1: \frac{\partial q_{eff}}{\partial T} = 0, \quad \frac{\partial d}{\partial T} = 0, \quad \frac{\partial q_{eff}}{\partial d} < 0, \quad \frac{\partial^2 d}{\partial T^2} < 0.$$

$$\text{т. } e_2: \frac{\partial q_{\text{eff}}}{\partial T} = 0, \frac{\partial d}{\partial T} = 0, \frac{\partial q_{\text{eff}}}{\partial d} > 0, \frac{\partial^2 d}{\partial T^2} > 0.$$

Как следует из анализа рис.3, теплотери излучением приводят к появлению верхнего предела по диаметру, определяющий самовоспламенение частицы катализатора. В области диаметров частицы катализатора  $d_{i1} < d < d_{i2}$  наблюдается самовоспламенение, т.е. независимо от начальной температуры. А в областях диаметров частиц катализатора  $d_{e1} < d < d_{i1}$  и  $d_{i2} < d < d_{e2}$  воспламенение возникает в случае превышении начальной температуры частицы выше критического значения, которое определяется кривой соединяющие граничные точки данных интервалов.

При уменьшении концентрации в зависимости от температуры окружающего газа вырождение критических условий качественно происходит по-разному. При более низкой температуре газа при понижении концентрации сперва происходит вырождение критических условий самовоспламенения, а при более низкой концентрации и критических условий, соответствующих потуханию частицы катализатора (рис.3а).

При более высокой температуре вырождение критических условий воспламенения и потухания происходит одновременно (рис. 3б). При уменьшении концентрации окислителя сперва вырождаются верхние пределы по диаметру, а при более низкой концентрации горючего – нижние пределы по диаметру.

### 3. Аналитическое определение критических условий.

Для определения критических условий применим условие  $\frac{\partial C_a}{\partial T} = 0$ , в результате расчета которого получим квадратное уравнение относительно диффузионно-кинетического отношения (числа Семенова):

$$\left( \frac{T - T_g}{RT^2/E} - 1 \right) \left( \frac{\beta}{k} \right)^2 - \left( 1 - \frac{\varepsilon\sigma(T^4 - T_w^4)}{k\rho_g c_g RT^2/E} + \frac{4\varepsilon\sigma T^3}{k\rho_g c_g} \right) \frac{\beta}{k} - \frac{4\varepsilon\sigma T^3}{k\rho_g c_g} = 0,$$

Введя безразмерные величины:

$$A = \frac{4\varepsilon\sigma T^3}{k\rho_g c_g}, \quad D = \frac{\varepsilon\sigma(T^4 - T_w^4)}{k\rho_g c_g RT^2/E}, \quad 2B = 1 - D + A, \quad C = \frac{T - T_g}{RT^2/E} - 1.$$

получим квадратное уравнение

$$C \left( \frac{\beta}{k} \right)^2 - 2B \frac{\beta}{k} - A = 0.$$

Решением квадратного уравнения является

$$\frac{k}{\beta} = \frac{C}{B \pm \sqrt{B^2 + AC}}$$

или

$$d_{i,e} = \frac{D_g Nu}{k} \cdot \left( \frac{T - T_g}{RT^2/E} - 1 \right) \cdot \frac{1}{\left( B \pm \sqrt{B^2 + AC} \right)}. \quad (7)$$

Критическое значение концентрации при подстановке (7) в (4) при этом

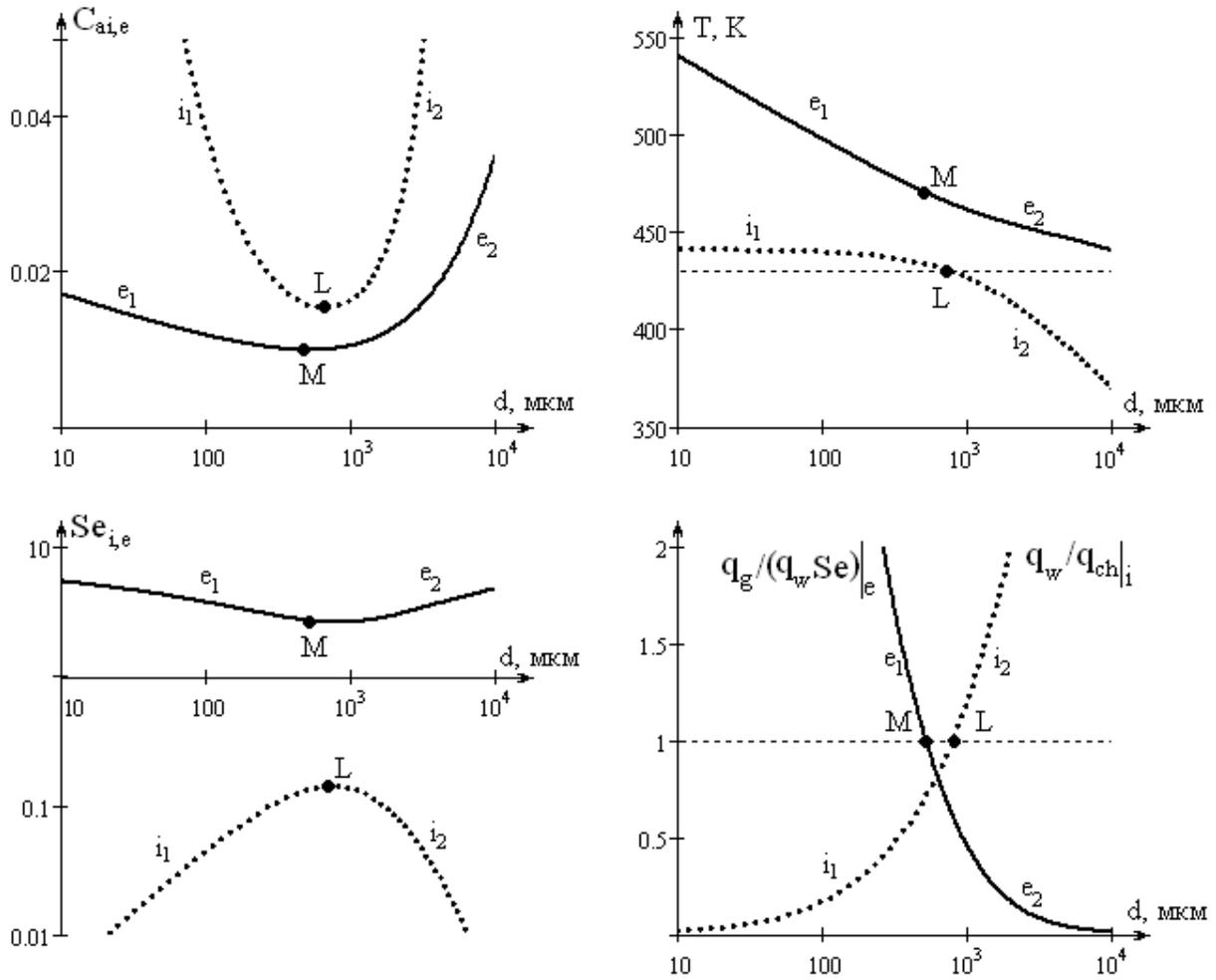


Рис. 4. Зависимость критических значений концентрации горючего (а), температуры (б) катализатора, числа Семенова (с) и отношения тепловых потоков (д) от диаметра частицы при  $T_g = 430$  К,  $T_w = 300$  К с учетом теплопотерь излучением. Расчет по формулам (7) и (8).

определится как

$$C_{ai,e} = \frac{c_g RT^2}{Q_a E} \left( 1 + C + D + \frac{1+C}{C} \left( B \pm \sqrt{B^2 + AC} \right) + \frac{DC}{B \pm \sqrt{B^2 + AC}} \right). \quad (8)$$

На рис. 4 представлена зависимость критического значения концентрации от размера частицы с учетом теплообмена излучением при температуре  $T_g = 430$  К,  $T_w = 300$  К. При данной температуре газа существует две критические зависимости концентрации от диаметра частицы.

Верхняя кривая (т. i, рис.4, кривая 2) определяет критические условия для самопроизвольного перехода на высокотемпературный режим окисления (воспламенения). На данной зависимости наблюдается минимум, который можно объяснить следующим образом. При малых диаметрах частицы с ростом размера уменьшается теплоотдача к более холодному газу (рис. 4б). Поэтому для воспламенения можно понизить концентрацию активного компонента в газовой среде. Вблизи точки минимума критическая температура воспламенения частицы близка к температуре газовой среды (практически равны). При дальнейшем увеличении диаметра газ уже нагревает частицу (критическая температура час-

тицы меньше температуры газа), но тем меньше, чем больше размер частицы. Помимо этого увеличивается относительная роль теплотерь излучением. Таким образом, для воспламенения необходимо повысить концентрацию кислорода. Влияние диаметра частицы на химическое тепловыделение мало, т.к. химическая реакция в критических точках протекает практически в кинетической области ( $Se_i < 0.2$ , рис.4с). Таким образом, теплотерь излучением определяют верхний предел по диаметру для воспламенения частицы. Напомним, что нижний предел воспламенения по диаметру определяется теплотерями с газом молекулярно-конвективным путем.

Для определения параметров точки минимума (т. L) на кривой воспламенения воспользуемся дополнительным условием  $\frac{\partial q_{eff}}{\partial d} = 0$ , что эквивалентно условию  $\frac{\partial C_a}{\partial d} = 0$ . Т.е. точка L характеризуется условиями

$$q_{eff} = 0, \quad \frac{\partial C_a}{\partial T} = 0, \quad \frac{\partial C_a}{\partial d} = 0. \quad (9)$$

Так, как в этой точке число Семенова намного меньше единицы, условие стационарности можно упростить к виду:

$$Q_a C_a k \rho_g = \alpha (T - T_g) + \varepsilon \sigma (T^4 - T_w^4). \quad (10)$$

$$\text{или} \quad C_a = \frac{\beta c_g \rho_g (T - T_g) + \varepsilon \sigma (T^4 - T_w^4)}{Q_a k \rho_g}. \quad (11)$$

Применив третье условие (9) к (11) получим  $T_i = T_g$ . Подстановка в условие стационарности (10) дает условие равенства в этой точке плотности мощности химического тепловыделения и плотности теплотерь излучением (рис. 3d):

$$\left. \frac{q_w}{q_{ch}} \right|_L = \frac{\varepsilon \sigma (T_g^4 - T_w^4)}{Q_a k (T_g) \rho_g C_a} = 1.$$

Применив второе условие (9) к (10), получим

$$-\frac{E}{RT^2} (\beta c_g \rho_g (T - T_g) + \varepsilon \sigma (T^4 - T_w^4)) + \beta c_g \rho_g + 4\varepsilon \sigma T^3 = 0.$$

При подстановке  $T_i = T_g$  получим второе условие для т. L

$$-\frac{E}{RT_g^2} \varepsilon \sigma (T_g^4 - T_w^4) + \alpha + 4\varepsilon \sigma T_g^3 = 0$$

$$\text{или} \quad \frac{\varepsilon \sigma T_g^3 E}{\lambda_g Nu RT_g^2} d \left( 1 - \frac{4RT_g}{E} - \frac{T_w^4}{T_g^4} \right) = 1.$$

Из полученной формулы следует, что минимум на кривой воспламенения возможен только при условии, что  $T_w < T_g$ , а именно  $T_w < T_g \sqrt[4]{1 - 4RT_g/E}$ .

Нижняя кривая (т. е.) определяет критические условия потухания. При параметрах системы, лежащих выше данной кривой, наблюдается гистерезисный

режим. Частица может перейти на высокотемпературный режим окисления путем увеличения ее начальной температуры выше критического значения. Для этих точек массоперенос активного компонента к поверхности частицы имеет большое значение. Число Семенова  $Se_e$  в этих точках больше 2.5. Качественно ход кривой напоминает кривую воспламенения. При малых частицах основную роль в теплопотери вносит теплоотдача к более холодному газу. Поэтому необходимо уменьшить концентрацию активного компонента для вынужденного перехода на высокотемпературный режим окисления. Уменьшение с ростом диаметра массопереноса кислорода к поверхности частицы и, следовательно, химического тепловыделения существенное, но не определяющее. Поэтому темп падения критического значения концентрации с ростом диаметра более пологий, чем в случае кривой воспламенения.

В ростом диаметра увеличивается относительная роль в общих теплопотерях теплообмена излучением, а также уменьшается массоперенос кислорода к поверхности частицы и, следовательно, химическое тепловыделение. Таким образом, для вынужденного перехода на высокотемпературный режим окисления необходимо помимо повышения начальной температуры повысить концентрацию активного компонента.

Параметры для точки минимума на кривой потухания (т. М) определяются аналогичными условиями, что и для т. L (только критерий Семенова в ней не является малым, а существенно больше единицы):  $q_{eff} = 0$ ,  $\frac{\partial C_a}{\partial T} = 0$ ,  $\frac{\partial C_a}{\partial d} = 0$ .

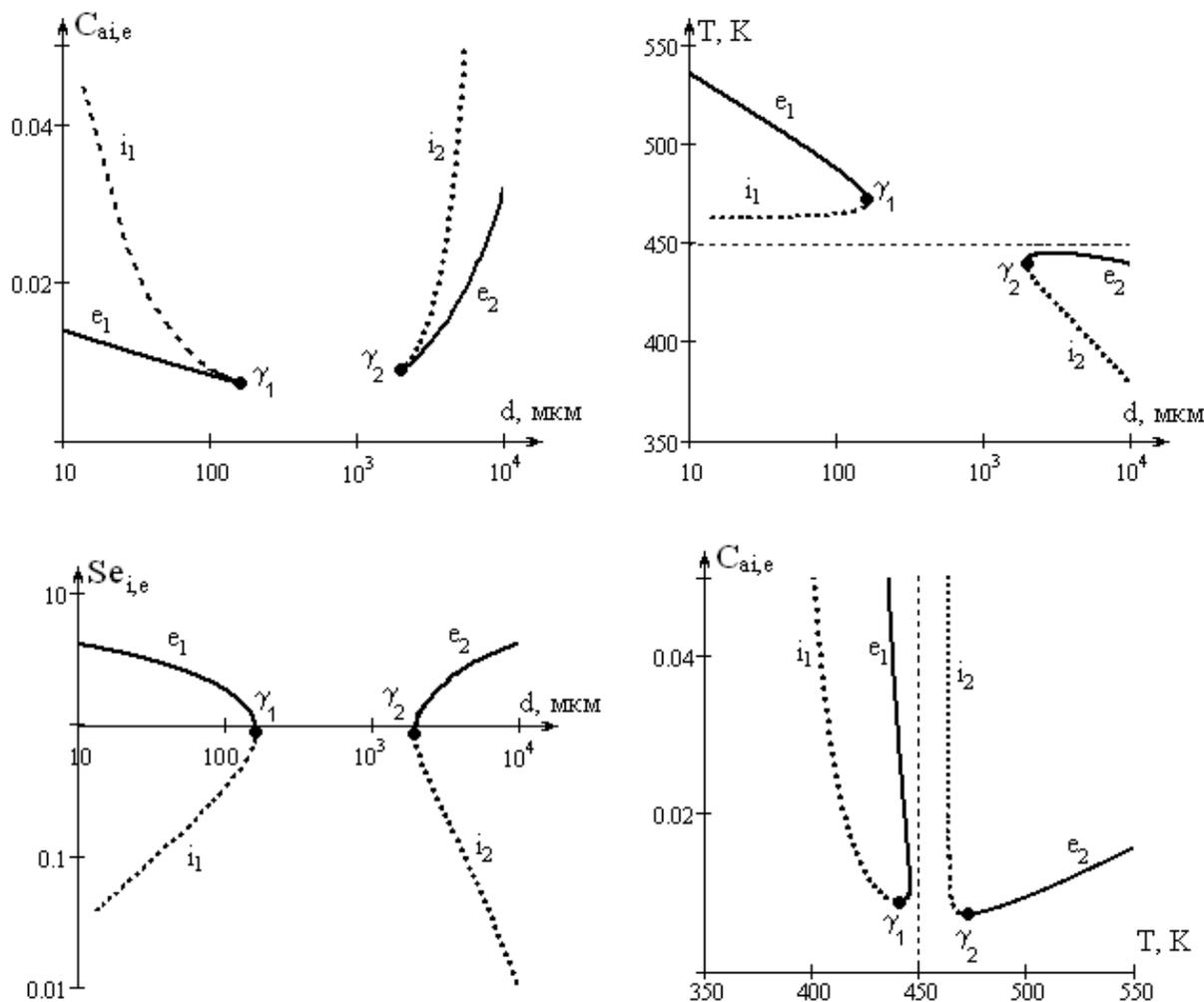
Используя условие стационарности (4) и условие минимума  $\partial C_a / \partial d = 0$ , получим для т. М соотношение между тепловыми потоками и диффузионно-кинетическим отношением:

$$\left. \frac{q_g}{q_w} \right|_M = \frac{\alpha(T_M - T_g)}{\varepsilon\sigma(T_M^4 - T_w^4)} = Se.$$

Выполнение этого условия дополнительно подтверждается на рис. 4d.

При **увеличении** температуры газа (рис. 5a) происходит качественное изменение критических зависимостей. Во-первых, в области малых размеров частиц катализатора критические зависимости ведут себя подобно, как и в отсутствие теплопотерь излучением (полуостров с точкой вырождения  $\gamma_1$ , сравним с рис. 3a и 3б, кривые 1). Во-вторых, в области больших размеров частиц также появляется полуостров с точкой вырождения  $\gamma_2$  (рис.5a). Критические температуры при больших диаметрах и при воспламенении, и при потухании меньше, чем температура нагретого газа, т.е. частица нагревается от газа.

Как и при более низкой температуре газа, существует область значений концентрации горючего, при которых существует четыре критических диаметра. А также существует область диаметров катализатора  $d_{\gamma_1} < d < d_{\gamma_2}$ , внутри которых происходит самопроизвольные переходы на высокотемпературный режим окисления независимо от начальной температуры и практически при любой концентрации активного компонента. При уменьшении концентрации активного компонента для этой области диаметров температуры каталитиче-



**Рис. 5.** Зависимость критических значений концентрации горючего (а), температуры (б) катализатора, числа Семенова (с) от диаметра частицы и концентрации горючего от температуры катализатора (д) при  $T_g = 450 \text{ K}$ ,  $T_w = 300 \text{ K}$  с учетом теплотерь излучением. Расчет по формулам (7) и (8).

ского горения приближаются к эффективной температуре окружающей среды, т.е происходит вырождение высокотемпературного окисления.

### Выводы.

Таким образом, в результате анализа устойчивости стационарной температурной зависимости концентрации окислителя получены в параметрическом виде зависимости критических значений температуры, размера частицы, концентрации окислителя и температуры газа. Показано, что при различных температурах газа теплотери излучением приводят к появлению верхнего предела по воспламенению и потуханию.

### Литература:

1. *Калинчак В.В., Черненко А.С., Мойса А.А.* Критические и устойчивые условия тепломассообмена химически активной частицы для реакции первого порядка // *Физика аэродисперсных систем.* – №. 46. – 2009. – С. 28-38.

2. Франк - Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 1987. – 502 с.
3. Мержанов А.Г., Барзыкин В.В., Абрамов В.Г. Теория теплового взрыва: от Н.Н. Семенова до наших дней // Химическая физика. – 1996. – Т.15, №6. – С.3-44.
4. Калинин В.В., Софронков А.Н., Черненко А.С., Мойса А.А., Головкин А.А. Критические условия и период индукции поверхностного горения газов на частицах катализатора. // Современные проблемы химической и радиационной физики. – Москва, Черноголовка: ОИХФ РАН. – 2009. – С. 33-36.

***Калинчук В.В., Черненко О.С., Сафронков О.Н., Калугин В.В.***

**Дві межі по діаметру частинки катализатора, що визначають високо-температурний тепломасообмін з активним газовим середовищем**

#### АНОТАЦІЯ

*З врахуванням тепловтрат випромінюванням проведено аналіз критичних, гістерезисних і стійких режимів високотемпературного тепломасообміну, що визначають самозаймання, запалювання, самовільне погасання й горіння хімічної реакції на поверхні частинки катализатора в активному газоподібному середовищі. Нижня межа по діаметру обумовлена тепловтратами теплопровідністю й конвекцією між частинкою катализатора і навколишнім газом. Поява другої межі пов'язана з тепловтратами випромінюванням, причому в критичній умові запалення температура частки менша за температуру газу. При різних співвідношеннях температур газу й стінок, що оточують газ, на залежностях критичних значень концентрації активного компонента від діаметра катализатора можливі наявність або мінімумів, або двох точок виродження.*

***Kalinchak V.V., Chernenko A.S., Safronkov A.N., Kalygin V.V.***

**Diameter two limits of the catalyst particle high temperature heat-mass exchange.**

#### SUMMARY

*Taking into account radiation heat losses, the analysis of critical, hysteresis, and stable regimes of high-temperature heat-mass exchange, which determine the spontaneous ignition, ignition, spontaneous extinction and combustion of a chemical reaction on the surface of catalyst particles in the active gaseous medium, is carried out. The diameter lower limit is determined with thermal conductivity heat losses and convection between catalyst particle and the surrounding gas. The appearance of the second limit is related to the radiation heat losses and at critical condition of ignition particle temperature is lower than gas temperature. For different ratios of the gas temperature and gas bounding walls temperature, the dependence of the critical concentrations of the active component versus the catalyst diameter will have or two minimums, or two points of degeneracy.*