

На основе анализа результатов проведенного исследования расходных характеристик определено оптимальное значение концентрации ПТП в растворе с водой. При этой концентрации потеря напора при прокачке воды уменьшается в 4 раза.

#### Выводы

1. Введение микродобавок ПТП (при концентрации порядка  $C=1\cdot 10^{-3}\dots 2\cdot 10^{-2}$  %) в воду снижает потерю давления при ее транспортировке по трубопроводам до 3...4 раз и повышает пропускную способность трубопровода до 2-х раз.
2. Существует оптимальная концентрация исследованной ПТП в воде, при которой уменьшение потерь давления максимально. Величина оптимальной концентрации добавки Kemtron 920 BPM составляет  $C=2\cdot 10^{-2}$  %. При этом потеря давления уменьшается примерно в 4 раза.
3. Увеличение концентрации исследованной ПТП в воде более  $2\cdot 10^{-2}$  % в дальнейшем не вызывает существенного уменьшения потери давления при прокачке воды по трубопроводу.
4. Применение исследованной добавки флокулянта Kemtron 920 BPM в качестве ПТП в технические водооборотные системы позволит получить значительную экономию энергозатрат при прокачке воды.

### О ВЛИЯНИИ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ КАТАЛИТИЧЕСКОГО ГОРЕНИЯ МАЛЫХ СОДЕРЖАНИЙ ГОРЮЧИХ ВЕЩЕСТВ В ВОЗДУХЕ НА ЧАСТИЦЕ КАТАЛИЗАТОРА

Черненко А.С.<sup>1</sup>, канд. физ.-мат. наук, доцент,  
Калугин В.В.<sup>1</sup>, аспирант,  
Калинчук В.В.<sup>1</sup>, доктор физ.-мат. наук, профессор,  
Софронков А.Н.<sup>2</sup>, доктор хим. наук, профессор

<sup>1</sup>Одесский национальный университет имени И.И. Мечникова, г. Одесса,  
Украина

<sup>2</sup>Одесская национальная академия связи имени А.С. Попова, г. Одесса,  
Украина

В обобщенных безразмерных параметрах проанализированы устойчивые высокотемпературные состояния, гистерезисные и критические условия теплообмена и каталитического беспламенного горения малых содержаний горючего газа в воздухе на частице катализатора. Доказано, что теплообмен излучением к холодным стенкам реакционной установки по отношению к более нагретому газу приводит к появлению верхней границы областей каталитического самовоспламенения, зажигания и погасания горючего газа по диаметру частицы катализатора. Получены критерии, разграничивающие области малых и больших частиц

катализатора, а также для минимальной концентрации каталитического зажигания горючего газа. Для области больших частиц установлено, что концентрация погасания газа увеличивается с ростом диаметра частицы катализатора, что объясняется увеличением диффузионного сопротивления. Доказано, что увеличение температуры воздуха приводит к уменьшению площадей гистерезисных петель на зависимостях скорости реакции от концентрации горючего газа и от диаметра частицы катализатора. Получено условие вырождения гистерезисных петель.

**Ключевые слова:** катализатор, частица, тепломассообмен, самовоспламенение, зажигание, гетерогенный катализ, тепловое излучение, тепловой гистерезис.

Для эффективного прогнозирования устойчивых режимов работы катализатора необходимо знание критических условий воспламенения и погасания газов на поверхности частицы катализатора [1, 2]. Эти условия определяют гистерезисные режимы тепломассообмена частицы катализатора с окружающим газом и характеризуются критическими значениями размера частицы катализатора, концентрацией горючих и токсичных газообразных реагентов; температурой окружающего газа. Внутри гистерезисных областей переход на высокотемпературные устойчивые режимы тепломассообмена катализатора происходит в результате повышения его начальной температуры выше температуры зажигания.

Выяснение роли массообмена и влияния теплообмена излучением в процессах каталитического горения, при определении критических условий воспламенения и погасания газов на поверхности частицы катализатора стало целью данной работы.

В работе рассматривается гетерогенно-каталитическая реакция (окисление  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  или  $\text{SO}_2$  в воздухе на платиновом катализаторе), протекание которой происходит согласно ударному механизму, когда молекулы горючего газообразного вещества, находящегося в недостатке в газе, сталкиваются с адсорбированной на поверхности молекулой окислителя, образуя продукты реакции. В этом случае скорость гетерогенно-каталитической реакции прямо пропорциональна относительной массовой концентрации горючего. При протекании этой реакции выделяется энергия, которая идет на нагревание катализатора.

Устойчивые и критические режимы тепломассообмена на поверхности частицы катализатора исследуются путем анализа прямых и обратных зависимостей концентрации горючего или диаметра катализатора от стационарной температуры катализатора (рис. 1 а,б) в зависимости от температуры газа, концентрации горючего газообразного вещества и диаметра катализатора.

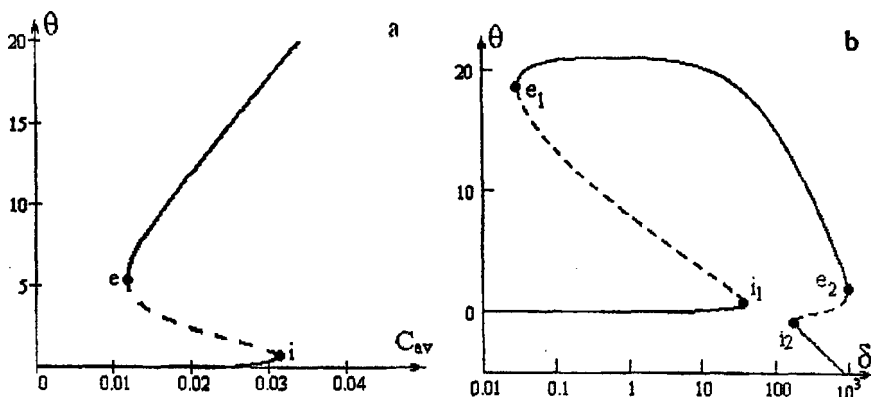


Рис. 1. а) Зависимость стационарной температуры катализатора от концентрации горючего для частицы катализатора диаметром  $\delta = 35.8$  (температурно-концентрационный гистерезис:  $C_{ave} < C_{av} < C_{avi}$ ,  $\theta_i < \theta_b < \theta_e$ ).

б) Зависимость стационарной температуры катализатора от диаметра катализатора при концентрации горючего  $C_{av} = 3.1\%$ ,  $\varepsilon_* = 0.932$  (двухпетлевой гистерезис:

$$1) \delta_{e1} < \delta < \delta_{i1}, \theta_{e1} < \theta_b < \theta_{i1}); 2) \delta_{e2} < \delta < \delta_{i2}, \theta_{e2} < \theta_b < \theta_{i2}).$$

Температура газа постоянна  $\gamma_g = 0.0257$ ; холодные стенки  $\gamma_w = 0.0175$ , большой тепловой эффект  $\gamma_Q = 0.765$ . Сплошные линии – устойчивые режимы, пунктирные – неустойчивые критические состояния, соответствующие влиянию начальной температуры катализатора.

В работе используются следующие безразмерные величины и параметры:

$$\delta = \frac{d}{Nu} \frac{Q_a \rho_g k_0}{\lambda_g RT_g^2/E} \exp\left(-\frac{E}{RT_g}\right), \quad \varepsilon_* = \frac{\varepsilon \sigma T_g^4}{Q_a \rho_g k_0} \exp\left(\frac{E}{RT_g}\right),$$

$$Se = \frac{d}{Nu} \frac{k_0}{D_a} \exp\left(-\frac{E}{RT_g}\right),$$

$$\theta = \frac{T - T_g}{RT_g^2/E}, \quad \gamma_w = \frac{RT_w}{E}, \quad \gamma_g = \frac{RT_g}{E}, \quad \gamma_Q = \frac{RQ_a}{Ec_g} Lu^{1-m}.$$

Здесь  $Q_a$  – тепловой эффект реакции, рассчитанный на килограмм горючего, Дж/кг;  $\lambda_g$  – коэффициент теплопроводности газа;  $\rho_g$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $T_g$ ,  $T_w$  – температуры газа и стенок, К;  $c_g$  – удельная теплоемкость газа Дж/(кг·К),  $Nu$  – число Нуссельта;  $d$  – диаметр катализатора, м;  $\epsilon$  – коэффициент черноты катализатора,  $Lu = D_a/a_g$  – критерий Льюиса.

При низкотемпературном окислении температура катализатора слабо возрастает с ростом концентрации горючего (рис. 1а). При достижении температуры  $\theta_i$  происходит скачкообразный переход на устойчивый высокотемпературный режим каталитического горения газов.

Температура каталитического горения линейно растет с ростом  $C_{av}$  при малых значениях  $\delta$  (при  $\delta\epsilon_* < 1$ ). С обратным ходом  $C_{av}$  при достижении значений  $C_{ave}$  и  $\theta_e$  происходит погасание каталитической реакции.

На стационарной зависимости  $C_{av}(\theta)$ , максимум характеризует критическое условие самопроизвольного воспламенения (точка  $i$ ), а минимум – критическое условие погасания (точка  $e$ ).

В интервале  $C_{avi} < C_{av} < C_{ave}$  наблюдается температурно-концентрационный гистерезис. При начальной температуре катализатора больше температуры зажигания (соответствующего значения  $\theta_{*i}$  на участке кривой  $C_{av}(\theta)$  между т.  $i$  и т.  $e$ ) температура катализатора с течением времени растет до температуры каталитического горения. В ином случае температура катализатора уменьшается, приближаясь к температуре низкотемпературного окисления.

Экстремумы на зависимости диаметра катализатора от стационарной температуры также соответствуют критическим условиям воспламенения и погасания газов (рис. 1б). При этом наблюдается двухпетлевой гистерезис: существуют две области диаметров катализаторов, где каталитическое воспламенение газов наблюдается при предварительном повышении начальной температуры катализатора выше температуры зажигания (пунктир, рис. 1б).

Применяя совместно с условием стационарности (1) условие экстремума  $\partial C_{av}/\partial \theta = 0$ , получены в параметрическом виде выражения для диаметров катализатора и концентрации горючего, соответствующих воспламенению (т. i) и погасанию (т. e) газов (рис. 2).

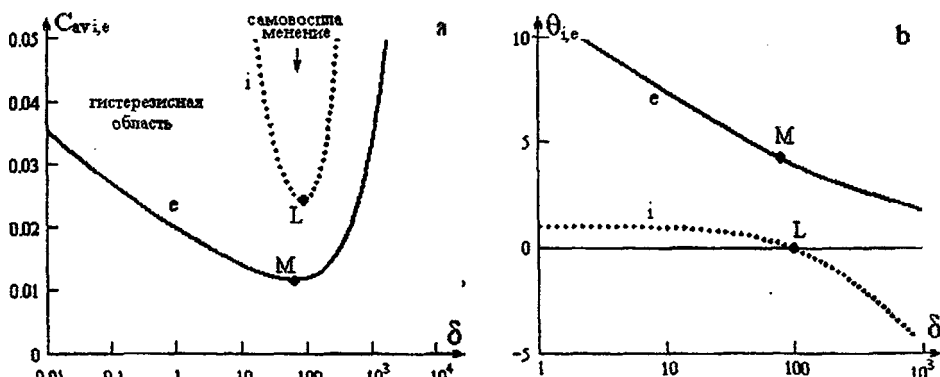


Рис. 2. Зависимость критических значений а) концентрации горючего и б) температуры катализатора от диаметра частицы при  $\gamma_g = 0.0257$ ,  $\gamma_w = 0.0175$ ,  $\gamma_Q = 0.765$  с учетом теплопотерь на излучение.

Верхнюю кривую (т. i, рис.2а) назовем кривой воспламенения. При малых диаметрах частицы с ростом размера уменьшается теплоотдача к более холодному газу (рис. 2d). Поэтому для воспламенения можно понизить концентрацию горючего 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 частицы меньше температуры газа), но тем меньше, чем больше размер частицы. Помимо этого увеличивается относительная роль теплопотерь на излучение. Таким образом, для воспламенения необходимо повысить концентрацию горючего. При этом влияние диаметра частицы на химическое тепловыделение мало (кинетическая область, диффузионно-кинетическое отношение  $Se_i < 0.2$ ). Таким образом, нижний предел воспламенения по диаметру определяется теплопотерями с газом молекулярно-конвективным путем, а теплопотери на излучение определяют верхний предел.

Нижнюю кривую (т. e) назовем кривой погасания (рис.2а). Качественно ход этой кривой напоминает кривую воспламенения. При параметрах системы, находящимися между кривыми воспламенения и погасания, наблюдается гистерезисный режим. При малых частицах основную роль в теплопотери вносит теплоотдача к более холодному газу. Поэтому зажигание газов возможно при меньшей концентрации горючего.

Уменьшение с ростом диаметра массопереноса горючего к поверхности частицы и, следовательно, химического тепловыделения существенное (число Семенова  $Se_e > 1$ ), но не определяющее. Поэтому темп падения критического значения концентрации с ростом диаметра более пологий, чем для воспламенения.

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

При условии протекания химической реакции в кинетической области и условии холодных стенок установки параметры минимума на зависимости критического значения концентрации от диаметра частицы определяются как

$$\delta \epsilon_* \left( 1 - 4\gamma_g - \frac{\gamma_w^4}{\gamma_g^4} \right) \Big|_L = 1, \quad (1)$$

$$\theta_L = 0, \quad C_{avL} = \frac{M_g}{M_a} \epsilon_* \left( 1 - \frac{\gamma_w^4}{\gamma_g^4} \right) \Big|_L.$$

Следовательно, можно ввести критерий, который позволяет разделить всю область диаметров на мелкие ( $\tilde{d} < 1$ , где  $\tilde{d}$  — левая часть (1)), когда роль теплообмена излучением мала, и крупные ( $\tilde{d} > 1$ ), когда она существенна.

Из (1) следует, что температура холодных стенок, когда будет наблюдаться минимум на кривой воспламенения, должна быть  $\gamma_w < \gamma_g \sqrt[4]{1 - 4\gamma_g}$ .

В качестве примера рассмотрим каталитическое окисление аммиака на платиновом шарике ( $\epsilon = 0.15$ ) с кислородом воздуха до образования окиси азота NO. 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>; свойства воздуха взяты при температуре 450 К. Оценка параметров точки минимума (т. L) для  $T_g = 430$  К,  $T_w = 300$  К показала, что  $C_{avL} = 2.25\%$  и  $d_L = 4$  мм.

При использовании в качестве носителей платинового катализатора часто используют графитовые частицы. В этом случае коэффициент черноты частицы увеличивается в 5 раз ( $\epsilon \approx 0.75$ ). Это приводит к возрастанию в 5 раз предельной концентрации горючего  $C_{avL} = 11.25\%$  и понижению в 5 раз диаметра  $d_L = 0.8$  мм.

### Выводы

Таким образом, для данной температуры газа ( $\gamma_g = 0.0257$ ) и холодных стенок установки ( $\gamma_w = 0.0175$ ) при концентрации горючего в газе выше  $C_{av,L}$  наблюдается двухпетлевой гистерезис (рис.1б). При этом в интервале размеров  $\delta_{11} < \delta < \delta_{12}$  наблюдается самовоспламенение газов на частице катализатора. С ростом концентрации горючего область самовоспламенения по диаметру катализатора увеличивается, как и гистерезисные области.

При уменьшении концентрации область гистерезисных петель уменьшается, и при концентрации горючего  $C_{av,M} < C_{av} < C_{av,L}$  наблюдаются лишь гистерезисные режимы тепломассообмена частицы катализатора при изменении диаметра катализатора  $\delta_{e1} < \delta < \delta_{e2}$  и начальной температуры катализатора  $\theta_{e2} < \theta_b < \theta_{e1}$ .

При еще меньших концентрациях  $C_{av,M} > C_{av}$  устойчивое каталитическое горение газов невозможно даже при повышении начальной температуры катализатора.

### Литература

1. Калинин В.В., Софронков А.Н., Черненко А.С. и др. Критические условия и период индукции поверхностного горения газов на частицах катализатора // Космический вызов XXI века. – 2011. – Т.4. – С. 134-138.
2. Ассовский И.Г. О зажигании, погасании и тепловом гистерезисе гетерогенной экзотермической реакции // ФГВ. – 1998. – Т. 34, №34. – С. 51-57.

УДК 621.757:697.71

### ЭКОЛОГО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА НЕКОТОРЫХ ПРОЦЕССОВ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Геллер В.З., д-р техн. наук., проф., Тригуба В.В., студ.

Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса.

Вопросы энергосбережения являются для Украины важнейшими экономическими и экологическими проблемами на данном этапе развития. В качестве фактора, определяющего эти проблемы, нами рассмотрена полная эквивалентная эмиссия парниковых газов (ПЭЭПГ). Методика расчета ПЭЭПГ, разработанная на кафедре ИТФ, адаптирована к эколого-энергетическому анализу коньячного и хлебопекарного производств и производства томатной пасты на полном жизненном цикле оборудования с учетом прямых и косвенных вкладов в конечный результат. Нами рассчитана и проанализирована полная эквивалентная эмиссия парниковых газов для