

ОБЩАЯ И ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

УДК 541.124.7

**ВОЗБУЖДЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ В ХИМИЧЕСКИХ ЦЕПНЫХ
ГАЗОФАЗНЫХ ПРОЦЕССАХ**

Г. Н. САРГСЯН

Институт химической физики им. А. Б. Налбандяна

НАН Республики Армения

Армения, 0044, Ереван, ул. П. Севака, 5/2

E-mail: gsargsyan@netsys.am

Поступило 22 VI 2009

Исследовано воздействие возбужденных частиц, а также связи поверхностных и объемных реакций на низкотемпературный цепной процесс окисления органических соединений. Методом математического моделирования показано, что если в результате гетерогенной рекомбинации радикалов в объем выходят ингибиторы реакции в возбужденном состоянии, а также активные продукты поверхностного распада, то вследствие этого в системе может происходить бифуркационное изменение динамического режима.

Рис. 9, табл. 1, библи. ссылки 17.

Исследование быстрых реакционных систем (в частности газофазных), в которых равновесие устанавливается за доли секунды, представляет интерес как для оптимизации химического производства, так и для химии и физики атмосферы, химических лазеров и т. д. Особый интерес представляет вопрос о влиянии на реакционную систему внешних факторов, в частности, теплообмена реакционной среды с окружающей средой, путем теплопроводности вследствие контакта реакционной среды с поверхностью реакционного сосуда, а также путем излучения возбужденных частиц. Важную роль может играть также модификация поверхности реакционного сосуда в течение реакции, а также квадратичный обрыв цепей (рекомбинация радикалов).

Правомерность учета вышеизложенных факторов обусловлена многочисленными экспериментальными данными разных авторов [1- 4], ко-

которые наблюдали сильное влияние покрытия поверхности реакционных сосудов на интенсивность газофазного окисления органических соединений и CO , а также важную роль теплообмена на установление динамических реакционных режимов.

Другим важным фактором является образование в ходе реакции возбужденных частиц, которые оказывают сильное влияние на цепные процессы [5-8]. Например, в работе [6] путем математического моделирования показано, что при низкотемпературном окислении CO с добавкой водорода возбужденные продукты реакции — CO_2^* , могут стимулировать обратный процесс и, как следствие, приводить к концентрационным осцилляциям в системе.

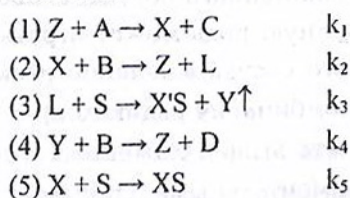
Как показано в работе [8], в условиях цепных газофазных реакций распад ведущих цепь радикалов на другие активные частицы, вследствие их столкновения с возбужденными частицами, может менять путь реакции и в определенных условиях вызывать осцилляционные явления при низкотемпературном окислении ацетальдегида. Следовательно, вопрос взаимосвязи поверхностных и объемных стадий цепных реакций требует досконального экспериментального и теоретического исследования в связи с их важностью в возникновении различных динамических режимов в реакционной системе.

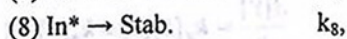
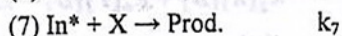
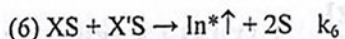
Исходя из вышеизложенного представляется интересным моделирование процесса низкотемпературного окисления с учетом взаимовлияния поверхностных и объемных процессов с участием возбужденных частиц.

В данной работе влияние поверхности на объемные процессы объясняется двумя основными факторами: гетерогенная рекомбинация радикалов с выходом в объем продукта и распад неустойчивого промежуточного продукта объемной реакции на поверхности с выходом в объем активного компонента.

Модель и математический формализм

Рассмотрим предложенную нами обобщенную модель (которая является развитием модели, предложенной в работе [6] для объяснения концентрационных осцилляций в системе $\text{CO} + \text{H}_2 + \text{O}_2$) гомогенно-гетерогенного процесса, допускающую возникновение концентрационных осцилляций в реакционной системе при окислении органических соединений в проточных системах.





где A, B — исходные вещества; X, Y, Z — активные частицы; S — поверхностный активный центр; XS, X'S — адсорбированные на поверхности стенки активные частицы; L — неустойчивый промежуточный продукт; C, D — продукты; In* — возбужденная частица, промежуточный продукт реакции, превращающий ведущий цепь радикал в слабо реагирующий с исходным веществом радикал, который путем объемной квадратичной рекомбинации превращается в вещество, удаляющееся из системы. Например, (a) — $\text{HS} + \text{HS} \rightarrow \text{H}_2(\text{v} \gg 1) + 2\text{S}$; (б) — $\text{H}_2(\text{v} \gg 1) + \text{RO}_2(\text{RCO}_3) \rightarrow (\text{H}_2 \cdot \text{RO}_2)^* \rightarrow \text{RH} + \text{HO}_2$ или $(\text{H}_2 \cdot \text{RCO}_3)^* \rightarrow \text{RH} + \text{HO}_2 + \text{CO}$; (с) — $2\text{HO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2 + \text{O}_2$, где $(\text{H}_2 \cdot \text{RO}_2)^*$ и $(\text{H}_2 \cdot \text{RCO}_3)^*$ — переходные комплексы. Энергия возбуждения водорода в данном случае $E_{\text{vz}} \geq 2,8 \text{ эВ}$ позволяет процессу (б) осуществиться. Таким образом внутренняя энергия возбуждения одного из участников элементарного акта может привести к образованию исходных веществ и ингибировать процесс.

Другой пример: $\text{OHS} + \text{CH}_3\text{OS} \rightarrow \text{CH}_2\text{O}^* + \text{H}_2\text{OS}$; $\text{CH}_2\text{O}^* + \text{RCO}_3 \rightarrow \text{CH}_2\text{O} + \text{RO} + \text{CO}_2$, что также приводит к ингибированию процесса окисления ацетальдегида [7]. В этом случае молекулы возбужденного формальдегида в метастабильном состоянии ингибируют процесс.

В модели принимается, что частица L — неустойчивый промежуточный продукт реакции (2), распадается на поверхности стенки с выходом в объем радикала (3). Адсорбированные на поверхности стенки активные частицы, вследствие гетерогенной рекомбинации (6), генерируют возбужденную частицу, которая в объеме по сложной цепи реакций превращает активную частицу X в продукт реакции (7).

Целью изучения предложенной модели являлось наиболее общее и универсальное исследование возможности предложенной нами ранее идеи о роли возбужденных и других активных частиц, генерирующихся в приповерхностном слое реактора, в установлении динамических реакционных режимов [8]. Предложенная модель учитывает основные направления влияния поверхностных процессов на объемные. В частности, выход с поверхности в объем активной частицы, образующейся при поверхностном распаде промежуточного продукта реакции (3), а также возбужденной частицы, образующейся вследствие гетерогенной рекомбинации радикалов (6).

Кинетические уравнения, описывающие предложенную модель, представлены ниже:

$$\frac{d[X]}{dt} = k_1[Z][A] - k_2[X][B] - k_5[X][S] - k_7[\text{In}^*][X]$$

$$\begin{aligned}
\frac{d[Z]}{dt} &= k_2[X][B] + k_4[Y][B] - k_1[Z][A] \\
\frac{d[Y]}{dt} &= k_3[L][S] - k_4[Y][B] \\
\frac{d[L]}{dt} &= k_2[X][B] - k_3[L][S] \\
\frac{d[X'S]}{dt} &= k_3[L][S] - k_6[XS][X'S] \\
\frac{d[XS]}{dt} &= k_5[X][S] - k_6[XS][X'S] \\
\frac{d[In^*]}{dt} &= k_6[XS][X'S] - k_7[In^*][X] - k_8[In^*]
\end{aligned}$$

Так как в проточных системах, когда исходные вещества непрерывно подаются в систему, а продукты уводятся из неё, реакция системы быстро достигает равновесного состояния, то для описания системы производные концентраций активных частиц и промежуточных продуктов по времени, как правило, приравниваются к нулю, а концентрации исходных веществ принимаются постоянными, кроме концентраций тех частиц, которые участвуют в нелинейных реакциях [6, 9]. Кроме того, во избежание ненужных математических сложностей принимается, что количества адсорбированных на поверхности активных частиц XS и $X'S$ равны между собой, и пишется одно суммарное уравнение, описывающее изменение общего количества адсорбированных активных частиц ($XS + X'S = QS$) со временем, где QS — общее количество адсорбированных активных частиц, гетерогенная рекомбинация которых приводит к образованию возбужденного ингибитора.

С учетом этих приближений, а также принимая, что $[S] = [S^0] - [QS]$, где $[S^0]$ — максимальное число активных центров на единице поверхности стенки, можно получить три дифференциальных уравнения, описывающих процесс:

$$\frac{d[X]}{dt} = k_2[X][B] - k_5[X]([S^0] - [QS]) - k_7[In^*][X]$$

$$\frac{d[In^*]}{dt} = k_6[QS]^2 - k_7[In^*][X] - k_8[In^*]$$

$$\frac{d[QS]}{dt} = k_2[X][B] + k_5([X]([S^0] - [QS]) - \frac{k_6[QS]^2}{2})$$

Для облегчения решения системы уравнений введём более удобные переменные:

$$y_0(t) \equiv \frac{[X]}{[X_p]}, y_1(t) \equiv \frac{[In^*]}{[X_p]}, y_2(t) \equiv \frac{[QS]}{[X_p]}, S_r \equiv \frac{[S^0]}{[X_p]}, \text{ где } [X_p] - \text{равновесная}$$

концентрация активной частицы X .

$$\frac{dy_0(t)}{dt} = k_2[B]y_0(t) - k_5[X_p](S_r - y_2(t))y_0(t) - k_7[X_p]y_1(t)y_0(t)$$

$$\frac{dy_1(t)}{dt} = k_6[X_p]y_2(t)^2 - k_7[X_p]y_1(t)y_0(t) - k_8y_8(t)$$

$$\frac{dy_2(t)}{dt} = k_2[B]y_0(t) + k_5[X_p](S_r - y_2(t))y_0(t) - \frac{k_6[X_p]y_2(t)^2}{2}$$

Представлялось интересным найти решения системы в условиях, близких в реально наблюдаемым при низкотемпературном окислении органических соединений. Значения характеризующих параметров приведены в таблице.

Таблица

Значения параметров, характеризующих реакцию систему при низкотемпературном окислении органических соединений, использованные при расчете модели

	S_r	$k_2[B],$ с^{-1}	$k_5[X_p],$ с^{-1}	$k_6[X_p],$ с^{-1}	$k_7[X_p],$ с^{-1}	k_8	$[X_p],$ част./см^3
I- набор (рис. 1-2)	100	1000	0.01	120	15	1	10^{11+13}
II набор (рис. 3-4)	500	1000	0.1	120	5	2	10^{11+13}
III набор (рис. 5-6)	1500	1000	0.25	0.6	250	4000	10^{11+13}
IV набор (рис. 7-8)	1200	1000	0.125	1	250	10000	10^{11+13}

В таблице приводятся значения следующих характеризующих реакцию параметров: k_8 — параметр, характеризующий время релаксации возбужденной частицы In^* .

В данной работе рассматриваются два случая релаксации ингибитора. Если ингибитор — электронно-возбужденная частица в метастабильном состоянии (например возбужденный формальдегид) и лимитирующим процессом является его медленная релаксация (фосфоресценция), то $k_8 \cong 1 \div 2 \text{ с}^{-1}$, (рис. 1-4). Если возбужденный ингибитор — колебательно-возбужденная частица (допустим, высококолебательно-возбужденная молекула водорода), то k_8 — это константа скорости релаксации, умноженная на концентрацию атмосферного газа, тогда $k_8 = 4000 \div 10000 \text{ с}^{-1}$, (рис. 5-8). $k_2[B]$ параметр, характеризующий усредненное значение произведения константы скорости реакции активных частиц с исходными газами на концентрацию этих газов. И если учитывать, что при низких температурах k_2 имеет порядок примерно 10^{-16} , то $[B] \sim 10^{19} \text{ част./см}^3$, и следовательно, давление в системе будет порядка атмосферы. $k_5[X_p]$ характеризует интенсивность адсорбции активных частиц поверхностью реактора и по порядку соответствует среднему значению для физической адсорбции активных частиц.

$K_6[X_p]$ характеризует интенсивность гетерогенной рекомбинации и находится в пределах принятых величин. $k_7[X_p]$, характеризует взаимодействие между активной и возбужденной частицами. По порядку величины k_7 будет равняться 10^{-11+13} част/см³, что также в допустимых пределах. Надо отметить, что модель допускает варьирование характеризующих реакцию значений параметров в широком диапазоне и позволяет описывать процесс.

Решения вышеизложенной системы с использованием программы «MATCAD» методом решения системы дифференциальных уравнений с помощью функций «Rkadapt» при начальных условиях (табл.) приведены на рис. 1-8.

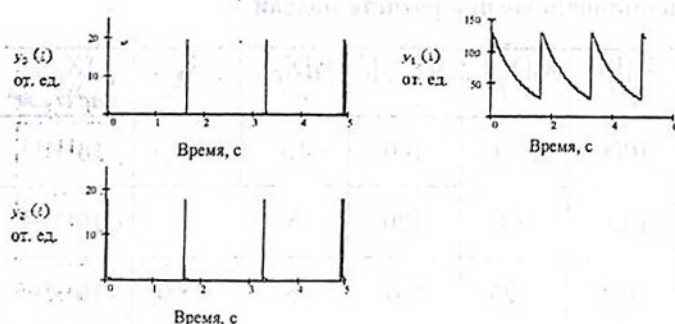


Рис. 1. Зависимости концентрации активных частиц $y_0(t)$, возбужденного ингибитора $y_1(t)$ и адсорбированных на поверхности реактора активных частиц $y_2(t)$ от времени в случае (1) (табл.).

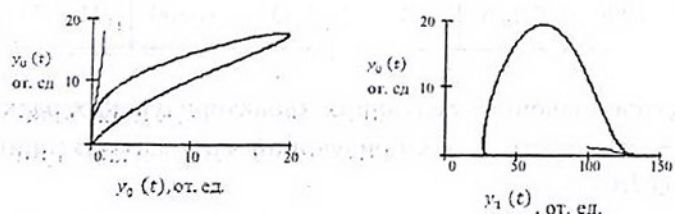


Рис. 2. Фазовые траектории системы (1), в фазовых пространствах $y_0(t)$, $y_2(t)$ и $y_0(t)$, $y_1(t)$ в случае (1) (табл.).

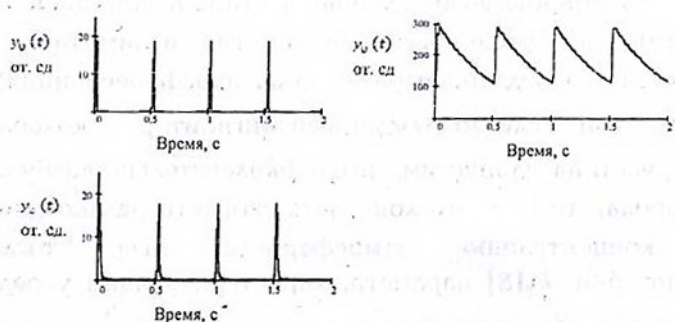


Рис. 3. Зависимости концентрации активных частиц $y_0(t)$, возбужденного ингибитора $y_1(t)$ и адсорбированных на поверхности реактора активных частиц $y_2(t)$ от времени в случае (2) (табл.).

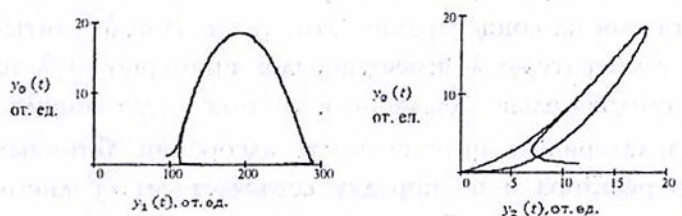


Рис. 4. Фазовые траектории системы (1), в фазовых пространствах $y_0(t)$, $y_2(t)$ и $y_0(t)$, $y_1(t)$ в случае (2) (табл.).

Видно, что при наборе характеризующих систему параметров, представленных выше, в реакционной системе с гетерогенно-гомогенными реакциями возникают осцилляции концентраций реагентов. Если возбужденная частица долгоживущая (когда возбужденная молекула релаксирует путем фосфоресценции, вследствие чего молекула оказывается в основном электронном, но в колебательно-возбужденном состоянии [10]), модель также допускает возникновение в реакционной системе концентрационных осцилляций.

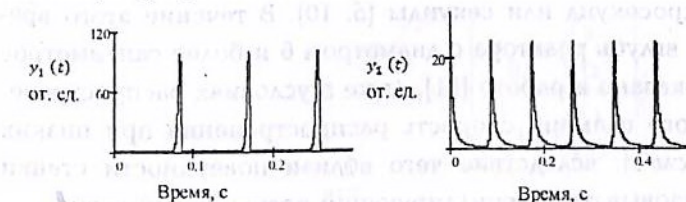


Рис. 5. Зависимости концентрации активных частиц $y_0(t)$, возбужденного ингибитора $y_1(t)$ и адсорбированных на поверхности реактора активных частиц $y_2(t)$ от времени в случае (3) (табл.).

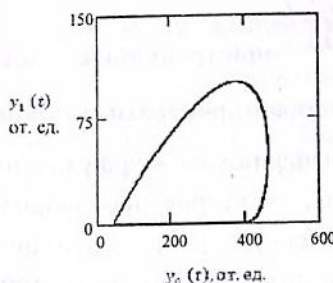
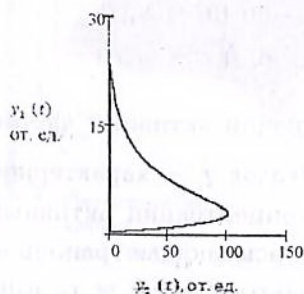
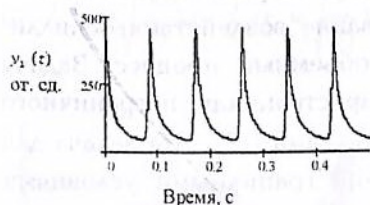


Рис. 6. Фазовые траектории системы (I), в фазовых пространствах $y_0(t)$, $y_2(t)$ и $y_0(t)$, $y_1(t)$ в случае (3) (табл.).

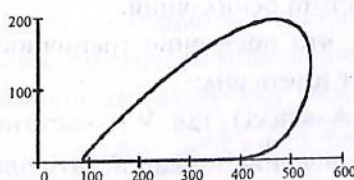
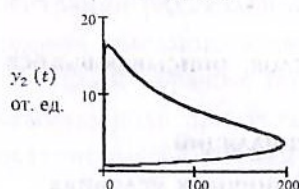
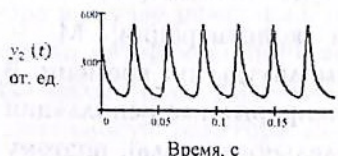
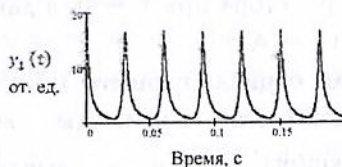
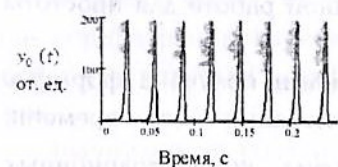


Рис. 7. Зависимости концентрации активных частиц $y_0(t)$ возбужденного ингибитора $y_1(t)$ и адсорбированных на поверхности реактора активных частиц $y_2(t)$ от времени в случае (4) (табл.).

Рис. 8. Фазовые траектории системы (I), в фазовых пространствах $y_0(t)$, $y_2(t)$ и $y_0(t)$, $y_1(t)$ в случае (4) (табл.).

Вышеизложенное демонстрирует универсальность модели и широкий диапазон ее возможного применения.

Приведенные в данной статье представления дают возможность развить совершенно новое направление, а именно, исследование влияния локализованного вблизи стенки реакционного сосуда осцилляционного явления на объемный процесс.

Дело в том, что возбужденный ингибитор, образующийся на поверхности реакционного сосуда, в общем случае может иметь время жизни порядка микросекунд или секунды [5, 10]. В течение этого времени диффузия его вглубь реактора с диаметром 6 и более сантиметров невозможна (как показано в работе [11], даже в условиях распространения фронта холодного пламени скорость распространения при низких температурах $\sim 2,4$ см/с), вследствие чего вблизи поверхности стенки реактора будет образовываться осциллирующий пограничный слой.

Поэтому представляет интерес исследование воздействия осциллирующего пограничного слоя реакции на объемный процесс. Задачу можно свести к решению проблемы распространения пограничного слоя, хорошо исследованной для волновых явлений [12]. Эта задача для волновых явлений с зависящими от времени граничными условиями описывается системой уравнений, представленной ниже:

$$n_{rr}(r,t) = a^2 n_{rr}(r,t) \quad n(r_0,t) = \mu_1(t) \\ (0 < r < r_0, t \geq 0) \quad \text{при граничных условиях: } n(0,t) = \mu_2(t),$$

где $a^2 = \frac{D}{\tau}$; n_{rr} — вторая производная концентрации активных частиц по времени; D — коэффициент диффузии радикалов; τ — характерное время реакции [4]; n_{rr} — вторая производная концентрации активных частиц (n) по радиусу сосуда; $\mu_1(t)$ — функция, описывающая граничное поведение системы в приповерхностном слое реактора при $r = r_0$; $\mu_2(t)$ — условие в центре реактора при $r = 0$, в данной работе для простоты расчетов принято $\mu_2(0) = A$.

В работе [13] для осциллирующего слоя нами получена формула, описывающая зависимость амплитуды колебаний от времени: $\eta = \sqrt{2} M \exp(mt) \sin(nt)$, где η — амплитуда концентрационных осцилляций вокруг стационарного значения концентрации; M — константа; m и n характеризуют изменение амплитуды по времени. В данном конкретном случае мы рассматриваем непрерывные осцилляции (наличие в фазовом пространстве системы предельного цикла), поэтому $m = 0$, а n — это частота осцилляций.

Отсюда следует, что поведение граничного слоя, описывающегося функцией $\mu_1(t)$, будет иметь вид:

$$\mu_1(t) = A \cdot \sin(vt), \text{ где } v — \text{частота осцилляций.}$$

Исходя из этого решение можно искать при граничных условиях:

$$n(r_0, t) = A \cdot \sin(v t)$$

$$n(0, 0) = A$$

$$n(r_0, 0) = A,$$

где A — константа, r_0 — радиус реактора, v — частота осцилляций пограничного слоя, t — время.

Для реактора с радиальной симметрией получается формула, описывающая процесс распространения осциллирующего пограничного слоя:

$$n(r, t) = A \sin(v t) \cdot \frac{J_0(rv \sqrt{\frac{\tau}{D}})}{J_0(r_0 v \sqrt{\frac{\tau}{D}})},$$

где $J_0(rv \sqrt{\frac{\tau}{D}})$ и $J_0(r_0 v \sqrt{\frac{\tau}{D}})$ — функции Бесселя нулевого порядка.

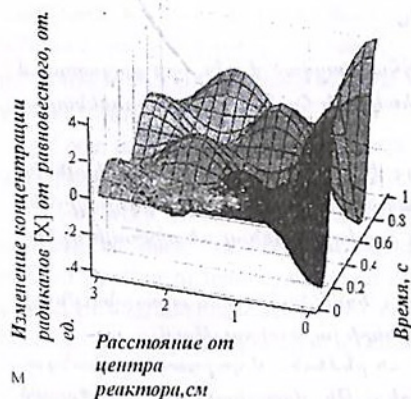


Рис. 9. Пространственно-временное развитие пограничного слоя при радиальной симметрии реактора. Осцилляционный пограничный слой локализован вблизи стенки реакционного сосуда на расстоянии 3 см от центра реактора ($\tau = 0,02$ с, $D = 0,2$ см²·с⁻¹, $r_0 = 3$ см, $v = 11$ с⁻¹), что соответствует данным рис. 5.

Из рис. 9 видно, что если в пограничном слое происходит колебание концентрации радикалов, то вследствие этого в объеме реактора может установиться осциллирующая пространственно-временная структура.

Значительный рост амплитуды осцилляций в направлении оси реактора в случае реактора с цилиндрической симметрией может быть обусловлен интерференцией волновых структур. Получается, что в этом случае малые периодические флуктуации концентрации радикалов вблизи поверхности реактора могут возбуждать интенсивные пульсации концентрации радикалов вдоль оси реактора и привести к возникновению фронта холодного пламени, что наблюдается в эксперименте [14-17].

Таким образом, показано, что возбужденные частицы могут играть важную роль при установлении динамических режимов в химических реакционных системах.



Развитые представления могут быть применены и для объяснения возникновения некоторых типов холодных пламен. Например, авторы работы [15] наблюдали образование фронта холодного пламени в центре цилиндрического сосуда и его распространение по направлению к стенкам. В свете вышеизложенных представлений это явление можно объяснить как следствие образования осцилляционных невидимых явлений вблизи поверхности и их воздействие на реакционную среду (рис. 9).

Таким образом, попадание в объем активных частиц — продуктов распада слабосвязанного промежуточного продукта объемной реакции и возбужденного продукта гетерогенных процессов (возбужденного ингибитора реакции), может создавать в реакционной системе поле пространственно-временных осциллирующих структур.

ԳՐԳՈՎԱԾ ՄԱՍՆԻԿՆԵՐԸ ՔԻՄԻԱԿԱՆ ԳԱԶ-ՖԱԶ ՇՂԹԱՅԱԿԱՆ ՊՐՈՑԵՍՆԵՐՈՒՄ

Գ. Ն. ՍԱՐԳՍՅԱՆ

Դիտարկվում է հետերոգեն-հոմոգեն պրոցեսի ընդհանրացված մոդել, որը բացատրում է օրգանական նյութերի օքսիդացման ընթացքում ռեակցիոն համակարգում կոնցենտրացիոն տատանումների ծագումը:

Մաթեմատիկական մոդելավորման միջոցով ցույց է տրված, որ եթե ռադիկալների հետերոգեն ռեկոմբինացիայի հետևանքով ծավալ թափանցան ռեակցիայի արգելակիչներ զրոգված վիճակներում, ապա համակարգում կարող է տեղի ունենալ ռեակցիայի դինամիկ ռեժիմի բիֆուրկացիոն փոփոխություն:

Մոդելի մաթեմատիկական հաշվարկը հաստատում է կոնցենտրացիոն տատանումների առկայությունը համակարգում պարամետրերի արժեքների լայն տիրույթում:

Առաջ քաշված տեսակետները հնարավորություն են ընձեռնում զարգացնել միանգամայն նոր ուղղություն, հետազոտել պատի մակերևույթի մոտակայքում առաջացած տատանողական երևույթի ազդեցությունը ծավալային պրոցեսի վրա:

Գլանային սիմետրիայով ռեակտորի օրինակի համար ստացվել է բանաձև, որը նկարագրում է մերձմակերևույթային տատանողական շերտի տարածումը դեպի ծավալ, պատճառ հանդիսանալով ծավալում ռեակցիայի ինտենսիվության տատանողական տարածքա-ժամանակային կառուցվածքների առաջացմանը:

EXCITED PARTICLES IN CHEMICAL GAS-PHASE PROCESSES.

G. N. SARGSYAN

A. B. Nalbandyan Institute of Chemical Physics NAS RA

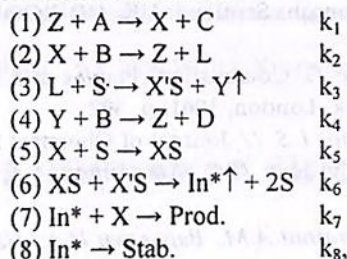
5/2 P. Sevak Str., Yerevan, 0044, Armenia

E-mail: gsargsyan@netsys.am

Study of fast reaction systems (particularly in gas-phase ones), where equilibrium is established in a fraction of a second, is of interest for both optimization of chemical industry and chemistry and physics of atmosphere, chemical lasers, etc.

This article takes into account two main factors responsible for the surface influence of volume process: factor 1 – heterogeneous recombination of radicals yielding product in a volume and 2 – decay of unstable intermediate product of volume reaction on surface yielding an active compounds in a volume.

The following scheme of reaction is considered:



where A, B – are initial substances, X, Y, Z – the active intermediate particles, S – surface active centers, XS, X'S – active particles adsorbed on the surface, L – non steady intermediate product, C, D – products of reaction, In* – the excited inhibitor of reaction.

The calculation of this scheme shows that in the system can raise oscillation of concentration of reaction components.

The fact is that excited inhibitor produced on the reaction surface can, in the general case, have lifetime of approximately a microsecond or a second. During this time, its diffusion into the depth of the reactor volume is impossible because of which oscillatory phenomena will be localized near the reactor wall surface and oscillation boundary layer will be formed.

For a reactor with radial symmetry the formula describing the expansion process of oscillation boundary layer is obtained.

Therefore, it can be concluded that penetration into the volume of active particles, products of decay of weakly coupled intermediate product of volume reaction and excited product of heterogeneous processes (excited inhibitor of the reaction) may form a field of spatial-time oscillation concentration structures in the reaction system in the form of standing waves with amplitude increasing to the reaction center.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Рубцов Н.М., Азатян В.В., Бородаулин Р.Р., Ростомян Г.Б., Сорока Л.Б. // Химическая физика, 1984, т.3, №12, с. 1719.
- [2] Азатян В.В., Шаверд А.А. // Химическая физика, 1983, т. 2, №2, с. 254.
- [3] Вартикян Л.А., Гарибян Э.Г., Григорян Г.Л., Варданын И.А., Налбандян А.Б. // Кинетика и катализ, 1980, т. 21, №1, с. 175.
- [4] Франк-Каменецкий Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М., Наука, 1967, 550 с.
- [5] Bamford C.H., Tipper C.F.H. *Comprehensive Chemical Kinetics*, v. 17, *Gas-Phase Combustion*, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam - Oxford New-York, 1977, p. 320.
- [6] Yang C.H. // *Combustion and Flame*, 1974. v. 23, p. 97.
- [7] Семенов Н.Н. Цепные реакции. Л., ОНТИ, Госхимиздат, 1934, 200 с.
- [8] Саргсян Г.Н. // ДНАН РА, 1995, т. 93, №3, с. 162.
- [9] Жаботинский А.М. Концентрационные автоколебания. М., Наука, 1974, 176 с.
- [10] Фано У., Фано Л. Физика атомов и молекул. М., Наука. 1980, 656 с.

- [11] *Basevich V.Ya., Vedeneev I.V., Arutyunyan V.S.* // Chem. Phys. Reports, 2000, v. 18(6), p. 1081.
- [12] *Тихонов А.Н., Самарский А.А.* Уравнение математической физики. М., Наука, 1977, 763 с.
- [13] *Sargsyan G.N., Vardanyan I.A.* // 9th International Symposium on Flow Visualization, Edinburgh, Scotland, UK, CD ROOM Proceedings, August 22-27, 2000, p. 266.
- [14] *Lewis B., Von Elbe G.* Combustion, Flames and explosion of gases. Academic Press Inc., New York, London, 1961, p. 592.
- [15] *Newitt D.M., Thornes L.S.* // Journal of Chemical Society, 1937, v.1656, p.1669.
- [16] *Погосян М.Дж., Гукасян П.С., Манташян А.А.* // Арм. хим.ж., 1980, т. 33, №1, с. 82.
- [17] *Дорунц А.Г., Арустамян А.М., Варданын И.А., Налбандян А.Б.* // Химическая физика, 1988, т. 7, №4, с. 564.