

диэлектриков [4]. Повышение оптической прочности прозрачных сред при уменьшении размеров зоны взаимодействия связано с уменьшением вероятности нахождения в облучаемой области поглощающей микронеоднородности «опасной» величины, что сопровождается резким увеличением статистического разброса экспериментальных данных. В рассматриваемом же случае инициирование происходит на некоторой глубине, где успевает сформироваться ореол рассеяния света. Это обстоятельство и определяет, в свою очередь, данную особенность инициирования азид-свинца.

Интересно также, что задержки вспышки, сопоставимые для азид-свинца с окончанием индукционного периода развития теплового очага, практически не зависят от размера облучаемой площадки. Следовательно, температура очагов разогрева, вызывающих инициирование, в первом приближении постоянна. Поэтому они реализуются в условиях одинаковой освещенности, а это возможно только при границах области подрыва, очень близких по форме к идеализированным границам, показанным на рис. 3. Таким образом, указанный факт подтверждает правомерность выбора этих границ из условий (1).

*Поступила в редакцию  
17/III 1980*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Е. И. Александров, А. Г. Вознюк. ФГВ, 1973, 14, 4, 86.
2. А. Ф. Беляев. Горение, детонация и работа взрыва конденсированных систем. М.: Наука, 1968.
3. А. П. Иванов. Оптика рассеивающих сред. Минск: Наука и техника, 1969.
4. И. В. Алешин, А. М. Бонч-Бруевич и др. ЖТФ. XLIII, 12, 2625.

### СТАЦИОНАРНЫЕ СОСТОЯНИЯ ДВУХФАЗНОГО ПРОТОЧНОГО РЕАКТОРА

*А. Л. Генкин, П. Л. Гусика, Л. П. Ярич  
(Ленинград)*

Тепловые режимы проточных гомогенных реакторов рассмотрены в работах [1—3], где методами теории горения исследованы стационарные состояния таких реакторов, их устойчивость, нестационарные процессы и др. В ряде важных в практическом отношении случаев (химико-технологические процессы и др.) экзотермические реакции протекают в двухфазных потоках. Наличие конденсированной фазы существенно изменяет характер процесса и приводит к появлению ряда отличительных особенностей. Это отличие проявляется, в частности, в зависимости характеристик двухфазных реакторов не только от кинетики реакций и теплообмена с окружающей средой, но и от аэродинамики течения, определяющей интенсивность межфазного взаимодействия (тепловую, концентрационную и скоростную неравновесность), времена пребывания компонентов в реакторе и др.

В настоящей работе формулируется постановка задачи о двухфазном реакторе идеального смешения и приводятся результаты исследования его стационарных состояний.

На рис. 1 показана принципиальная схема двухфазного реактора, в который с заданными температурами и массовыми расходами поступают газообразные и конденсированные реагенты. При движении смеси

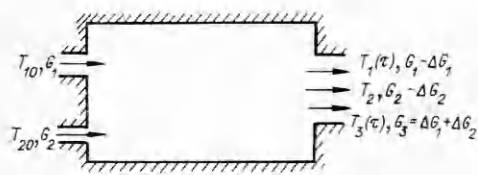


Рис. 1.

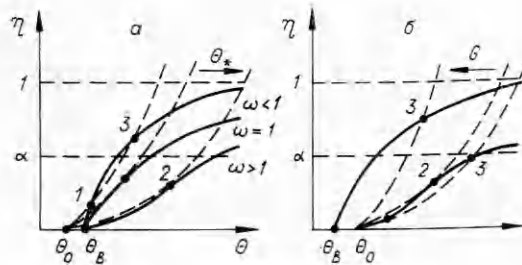


Рис. 2.

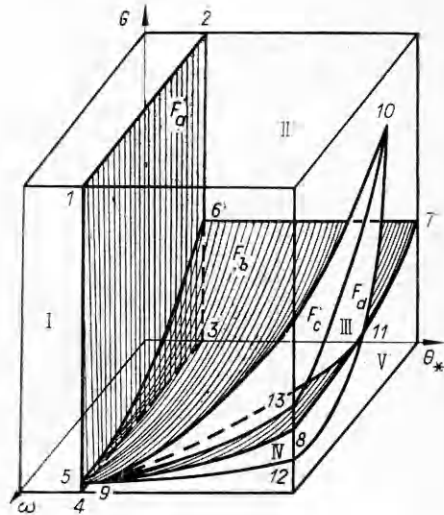


Рис. 3.

вследствие химических реакций и теплообмена со стенками и несущим газом происходит нагрев, воспламенение и горение частиц. Эти процессы, сопровождающиеся изменением концентрации окислителя, температуры частиц и газа, дисперсионного состава конденсированной фазы, а также фазовыми переходами, могут быть описаны системой уравнений неразрывности, движения, энергии и диффузии для течения двухфазного реагирующего потока. Так как решение такой системы сопряжено со значительными трудностями, используем в дальнейшем развитый в теории гомогенных реакторов приближенный подход, основанный на представлении об идеальности процесса смешения<sup>1</sup> [4—6]. Последнее позволяет считать концентрацию дисперсной фазы и температуру газа постоянными во всем объеме. При этом вследствие конечных скоростей химической реакции и теплообмена температура и степень выгорания частиц оказываются разными из-за различия времени их пребывания в реакторе.

Для описания стационарных состояний двухфазного автотермического реактора, в который поступает монодисперсная газовзвесь, используем уравнения теплового и материального баланса, записанные в следующем виде:

$$dH/dt = Q_I - Q_{II} = 0, \quad (1)$$

$$d\eta/dt = W - \eta/\tau_1 = 0, \quad (2)$$

где  $H = H_1 + H_2 + H_3$  — энтальпия смеси в реакторе;  $H_1 = cG \frac{\tau_1}{m_{10}} \int_0^\infty (1 - \eta_1) T_1 f(\tau) d\tau$ ;  $H_2 = c_2 T_2 \left( G_2 \tau_2 - \mu G_1 \tau_1 \int_0^\infty \eta_1 f(\tau) d\tau \right)$ ;  $H_3 = G_1 \tau_1 (1 + \mu) c_3 \int_0^\infty \eta_1 T_3 f(\tau) d\tau$ ;  $Q_I = qG_1 \int_0^\infty \eta_1 f(\tau) d\tau$  — скорость тепловыделения в реакторе;  $Q_{II} = \frac{H_1 - H_{10}}{\tau_1} + \frac{H_2 - H_{20}}{\tau_2} + \frac{H_3}{\tau_3}$  — скорость отвода тепла;  $\eta_1 = 1 - m_1/m_{10}$  — полнота выгорания отдельной частицы;  $\eta =$

<sup>1</sup> Такое допущение справедливо в случае, когда время пребывания смеси в реакторе существенно больше времени смешения.

$$= 1 - \frac{M_1}{M_{10}} = \int_0^{\infty} \eta_1 f(\tau) d\tau$$
 — суммарная полнота выгорания конденсированной фазы;  $M_1$  — масса непрореагировавшего вещества (к-фазы) в реакторе;  $G_1$  и  $G_2$  — соответственно массовые расходы частиц и газа;  $C$  — удельная теплоемкость;  $\tau_1, \tau_2, \tau_3$  — время пребывания частиц газа и продукта в реакторе<sup>2</sup>;  $W = \int_0^{\infty} \frac{d\eta_1}{d\tau} f(\tau) d\tau$  — средняя скорость реакции;  $f(\tau)$  — функция распределения частиц по времени их пребывания в реакторе;  $\mu$  — стехиометрический коэффициент; индексы 1, 2, 3 отвечают соответственно конденсированному реагенту, газу и продуктам реакции, 0 — параметрам на входе в реактор.

В уравнениях (1) и (2) осреднение по ансамблю частиц заменено осреднением по времени пребывания их в реакторе. Такой подход возможен лишь при анализе стационарных режимов, когда температура и степень выгорания частиц определяются только временем пребывания их в реакторе. В связи с последним уместно отметить, что стационарные режимы двухфазного реактора идеального смешения характеризуются неизменностью во времени лишь интегральных величин — суммарного тепловыделения и т. д. Параметры же отдельных частиц изменяются во времени. Поэтому система уравнений (1), (2) должна быть дополнена уравнениями, описывающими изменение температуры и степени выгорания частиц при различной температуре газа, и кинетическим уравнением, определяющим вид функции распределения.

Анализ стационарных состояний двухфазного реактора на основе численного решения такой системы уравнений весьма трудоемкий. Поэтому при качественном исследовании характеристик реактора целесообразно аппроксимировать действительную кривую изменения температуры частиц разрывной функцией:  $T_1 = \text{const}$ ,  $\eta_1 = 0$  при  $\tau \leq \tau_u$  ( $T_{10} \leq T_1 \leq T_u$ ,  $T_u$  — температура воспламенения,  $\tau_u$  — время прогрева);  $T_1 = T_3 = T = \text{const}$ ,  $\eta_1 = 1$  при  $\tau \geq \tau_u$  ( $T_2 \leq T \leq T_r$ ,  $T_r$  — адиабатическая температура горения), отражающей специфические особенности активированного процесса — незначительное изменение температуры в предпламенный период, резкий подъем температуры, а также равенство (или малое отличие) температуры продукта и несущего газа. Последнее выполняется строго для газообразных и приближенно для мелкодисперсных продуктов реакции.

Полагая, что число частиц с определенным временем пребывания, покидающих реактор, пропорционально общему числу таких частиц, находящихся в его объеме, получим функцию распределения

$$f(\tau) = 1/\tau_1 \cdot \exp(-\tau/\tau_1). \quad (3)$$

Используя уравнение теплового баланса частицы [6—8], определим время индукции  $\tau_u$

$$\frac{dT_1}{d\tau} = \left( \frac{q}{c_1} + aT_1 \right) \frac{3z}{r\delta^n} \exp\left(-\frac{E}{RT_1}\right) + \frac{3\alpha_k}{c_1\rho_1 r} [(T_2 - T_1) + \kappa(T_2^4 - T_1^4)], \quad (4)$$

где  $q$  — тепловой эффект реакции;  $z, n, E$  — кинетические константы;  $\delta$  — толщина пленки продукта;  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $\alpha_k$  — коэффициент теплоотдачи;  $\kappa = \sigma\varepsilon/\alpha_k$ ;  $\sigma$  — постоянная Стефана — Больцмана;  $\varepsilon$  — приведенная степень черноты;  $a = -\mu c_2/c_1$ ,  $a = 1$  — соот-

<sup>2</sup> Время пребывания продукта  $\tau_3$  зависит от размера образующихся при реакции частиц и изменяется в пределах  $\tau_3 \in [\tau_1, \tau_2]$ .

ветственно при образовании конденсированных и газообразных продуктов.

Уравнение (4) записано с учетом лучистого теплообмена между частицами в предположении об оптической прозрачности газа и идеальном отражении излучения от стенок реактора, температура которых полагается равной температуре газа. При малом изменении  $T_1$  и  $T_2$  в процессе предпламенного разогрева возможна линейная аппроксимация лучистого теплообмена и скорости тепловыделения за счет химической реакции, а также пренебрежение изменением линейных размеров частиц. Интегрирование уравнения (4) приводит к соотношению

$$\frac{\tau_u}{\tau_1} = \frac{\tau_0}{\tau_1} \ln \left( \frac{T_2 - k_I T_{10}}{T_2 - k_{II} T_B} \right), \quad (5)$$

где  $k_I = 1 - \alpha_k/\alpha \text{Se} (1 + q/c_1 T_{10})$ ;  $k_{II} = 1 - \alpha_k/\alpha \text{Se}_1 (1 + q/c_1 T_B)$ ;  $\text{Se}_1 = z c_1 \rho_1 / \alpha_k \exp(-E/RT_{10})$ ;  $\tau_0 = c_1 r \rho_1 / 3 \alpha (1 - \alpha_k/\alpha \cdot \text{Se}_1)^{-1}$ ;  $\alpha = \alpha_k + \alpha_n$ ;  $\alpha_n$  — коэффициент лучистого теплообмена. При этом температура воспламенения  $T_B$  определяется из уравнения (4) и условия  $d^2 T/d\tau^2 = 0$ . Соответствующее соотношение для расчета  $T_B$  имеет вид

$$\frac{a}{\delta^n} \text{Se}_1 \exp\left(-\frac{E}{RT_B}\right) - \frac{1 + 4\kappa \left(\frac{T_B}{T_{10}}\right)^3}{1 + \frac{E}{RT_{10}} + \frac{qE}{a c_1 R T_B^2}} \exp\left(-\frac{E}{RT_{10}}\right) = 0. \quad (6)$$

С учетом соотношений (3) и (5) и условия  $\mu c_2 + c_1 = (1 + \mu)c_3$  уравнения (1) и (2) преобразуются к виду

$$\eta_I = G \left( \frac{\Theta - \Theta_0}{\Theta_* - \Theta} \right), \quad (7)$$

$$\eta_{II} = \left( \frac{\Theta - \Theta_r}{\Theta - 1} \right)^\omega, \quad (8)$$

где  $\Theta = T_2/k_I T_{10}$ ;  $\Theta_0 = T_{20}/k_I T_{10} + c_1 G_1/c_2 G_2 k_I \cdot (1 - T_1/T_{10})$ ;  $\Theta_* = k_{II}/k_I \cdot T_B/T_{10}$ ;

$$\Theta_* = \frac{\tau_2}{k_I \tau_1} \left( \frac{T}{T_{10}} + \frac{q}{c T_{10}} \right) \pi; \quad G = \frac{c_2 G_2 \tau_2}{c_2 G_1 \tau_1} \pi; \quad \pi = \left[ a + (1 - a) \frac{\tau_2 T}{\tau_3 T_2} \right]^{-1};$$

$$\omega = \frac{\tau_0}{\tau_1}.$$

Система уравнений (7), (8) определяет зависимость стационарных значений температуры газа  $\Theta$  и глубины преобразования вещества  $\eta$  от пяти параметров  $G$ ,  $\omega$ ,  $\Theta_*$ ,  $\Theta_0$  и  $\Theta_r$ .

На рис. 2 показаны зависимости  $\eta_I(\Theta)$  и  $\eta_{II}(\Theta)$ , вычисленные по уравнениям (7) и (8) (пунктирные и сплошные линии соответственно). Точки пересечения кривых соответствуют решениям системы уравнений (7), (8). В случае, когда температура газа, поступающего в реактор, меньше температуры воспламенения, т. е.  $\Theta_0 < \Theta_*$  (см. рис. 2, а), возможно одно (касание кривых в точке 2) или два стационарных состояния. Отметим, что при этом имеется еще одно низкотемпературное состояние реактора, которое не может быть найдено в рамках рассматриваемой модели. При  $\Theta_0 \geq \Theta_*$  (см. рис. 2, б) и  $\omega \leq 1$  существует только одно, а при  $\omega > 1$  — одно, два или три стационарных состояния.

<sup>3</sup> Это условие — следствие допущения о независимости теплового эффекта реакции от температуры.

Максимально возможное значение температуры в реакторе  $\Theta_{\max}$  определяется начальным соотношением расходов компонентов. В случае, когда газообразный реагент находится в избытке ( $A = d/\mu \cdot G_2\tau_2/G_1\tau_1 = KG > 1$ ,  $K = c_1d/\mu c_2$ ,  $d$  — доля газообразного реагента в несущей среде),  $\Theta_{\max}$  может быть найдена из уравнения (7) при условии, что  $\eta = \eta_{\max} = 1$  по формуле

$$\Theta_{\max} = (\Theta_* + G\Theta_0)/(1 + G), \quad (9)$$

а при избытке конденсированной фазы ( $A \leq 1$ ) при  $\eta = \eta_{\max} = A$  по формуле

$$\Theta_{\max} = (k\Theta_* + \Theta_0)/(1 + k). \quad (10)$$

Так как режим работы двухфазного реактора определяется пятью параметрами, то в трехмерном параметрическом пространстве области существования стационарных состояний реактора можно отразить в виде 10 диаграмм. При этом каждой из них отвечают конкретные значения двух определяющих параметров. Как показывает анализ, наиболее существенное влияние на режим работы реактора оказывают параметры  $\omega$ ,  $G$ ,  $\Theta_*$ , а также соотношение между  $\Theta_b$  и  $\Theta_0$ . При заданных значениях температуры газа и частиц на входе в реактор параметр  $\omega$  характеризует среднее время пребывания частиц,  $\Theta_*$  — время пребывания газа,  $G$  — отношение расходов газа и конденсированной фазы.

На рис. 3 в качестве примера в пространстве параметров  $\omega$ ,  $G$ ,  $\Theta_*$  при  $\Theta_0 > \Theta_b$  показаны области существования стационарных состояний. Характерный вид сечений параметрического пространства плоскостями  $\Theta_* = \text{const}$  и  $\omega = \text{const}$  иллюстрирует рис. 4, а, б ( $\Theta_b = 3$ ,  $\Theta_0 = 4$ ,  $k = 1$ ). Видно, что в общем случае параметрическое пространство  $\omega G \Theta_*$  разделяется четырьмя поверхностями  $F_a$  (1, 2, 3, 4),  $F_b$  (5, 6, 7, 8),  $F_c$  (9, 10, 12) и  $F_d$  (9, 10, 13), определяющимися из условий:  $\Theta_{\max} = \Theta_0 - (F_a)$ ;  $\eta = A$ ,  $\Theta = \Theta_{\max} - (F_b)$ ;  $\eta_I = \eta_{II}$ ,  $\eta'_I = \eta'_{II} - (F_c, F_d)$ , на пять областей, соответствующих одному (II), одному или двум (IV) и трем (III) стационарным состояниям реактора, или отсутствию решений (I, V).

Аналогичным образом можно построить диаграмму при  $\Theta_0 < \Theta_b$ . В этом случае параметрическое пространство разделяется на четыре характерные области, которым отвечает одно или два стационарных состояния или отсутствие решений. Не обсуждая этот случай, остановимся более подробно на характерных особенностях процесса при  $\Theta_0 > \Theta_b$ .

Зависимость температуры газа и полноты выгорания от времени пребывания в реакторе  $\tau_1$  при различных значениях  $\tau_2$  для стационарного единственного или высокотемпературного состояния представлена на рис. 5, а, б. Здесь принято  $\Theta_b = 3$ ,  $\Theta_0 = 4$ ,  $k = 1$ ,  $c_1G_1/c_2G_2\mu = 2$ ,  $(T/T_{10} +$

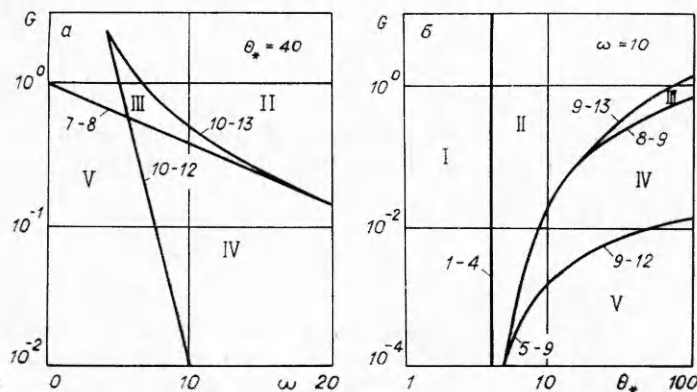


Рис. 4.

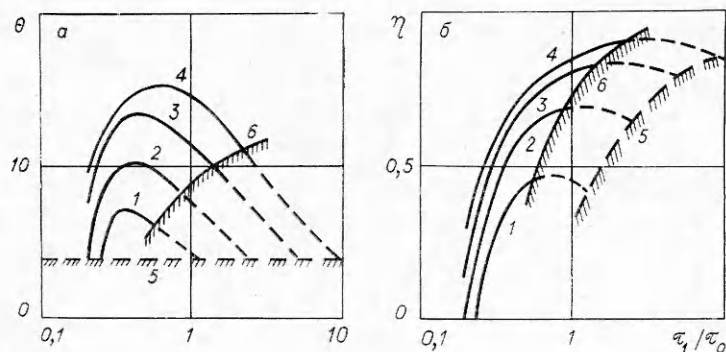


Рис. 5.

$+ q/c_1 T_{10}) \cdot \pi/k_1 = 10$ . Линиям 1—4 отвечают отношения  $\tau_2/\tau_0$ , равные соответственно 0,5; 1; 2 и 4. Линия 5, отвечающая условию  $\Theta = \Theta_0$ , ограничивает область существования стационарных решений, а линия 6 при условиях  $\eta = A \leq 1$ ,  $\Theta = \Theta_{\max}$ , определяет область, где стационарные режимы не реализуются из-за недостатка газообразного реагента.

Из приведенных зависимостей  $\Theta = \Theta(\tau_1, \tau_2)$  и  $\eta = \eta(\tau_1, \tau_2)$  следует, что с ростом времен пребывания  $\tau_1$  и  $\tau_2$  возрастает полнота выгорания частиц. При этом температура газа вначале растет, достигая экстремального значения, соответствующего максимальному разогреву газа в реакторе, а затем убывает. Величина максимального разогрева газа  $\varphi = (\Theta - \Theta_0)_{\max}/(\Theta_{\max} - \Theta_0)$  и соответствующего ему значения  $\eta$  возрастает с ростом отношения времени пребывания газа к времени пребывания частиц  $\tau_2/\tau_1$ .

Поступила в редакцию  
8/X 1980

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Мерзханов, В. Г. Абрамов. Chem. Eng. Sci., 1977, 32, 475.
2. А. Г. Мерзханов. Процессы горения в химической технологии. Препринт ОИХФ АН СССР, Черноголовка, 1976.
3. Б. В. Вольтер, И. Е. Сальников. Устойчивость режимов работы химических реакторов. М.: Химия, 1972.
4. Р. Арис. Анализ процессов в химических реакторах. М.: Химия, 1977.
5. К. Г. Денбиш. Теория химических реакторов. М.: Наука, 1968.
6. О. Левеншиль. Инженерное оформление химических процессов. М.: Химия, 1969.
7. Б. И. Хайкин, В. Н. Блошенко, А. Г. Мерзханов. ФГВ, 1970, 6, 4.
8. М. А. Гуревич, Г. Е. Озерова, А. М. Степанов. ФГВ, 1970, 6, 3.

#### О МЕХАНИЗМЕ СМЕСЕОБРАЗОВАНИЯ ЗА УДАРНОЙ ВОЛНОЙ, СКОльзяЩЕЙ ПО ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКОСТИ

А. А. Борисов, Б. Е. Гельфанд, С. М. Шерпанев, Е. И. Тимофеев  
(Москва)

Процессы горения и детонации двухфазных систем во многом определяются динамикой смешения газообразного и жидкого компонентов смеси. При детонации распыленного топлива, например, необходимая степень перемешивания компонентов, т. е. необходимая высокая скорость