

Дальнейшее развитие представлений о макроструктурных превращениях и количественный анализ процессов требуют уточнения вида замыкающих соотношений, в частности, реологического закона, силы межфазного трения, кинетического закона и его связи с удельной поверхностью реакции, а также кинетических и теплофизических параметров.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Алдушин А. П., Мержанов А. Г., Хайкин Б. И. // Докл. АН СССР.— 1972.— 206, № 4.— С. 905—908.
2. Алдушин А. П., Мержанов А. Г., Сеплярский Б. С. К теории фильтрационного горения металлов // ФГВ.— 1976.— 12, № 3.— С. 323—332.
3. Алдушин А. П., Ивлева Т. П., Мержанов А. Г. и др. // Процессы горения в химической технологии и металлургии/Под ред. А. Г. Мержанова.— Черногловка, 1975.
4. Ярин Л. П., Сухов Г. С. Основы теории горения двухфазных сред.— Л.: Энергоатомиздат, 1987.
5. Нигматуллин Р. И. Динамика многофазных сред.— М.: Наука, 1987.— Ч. 1.
6. Мусаев Н. Л. // Прикладная математика и механика.— 1985.— 49, № 2.— С. 334—336.
7. Скороход В. В. Реологические основы теории спекания.— Киев: Наук. думка, 1972.
8. Ergun S. // Chem. Eng. Progr.— 1952.— 28, N 2.— P. 89—94.
9. Смоляков В. К. Влияние структурных изменений на горение прессовок металлических порошков в газе // ФГВ.— 1988.— 24, № 3.— С. 18—26.
10. Хаппель Дж., Бреннер Г. Гидродинамика при малых числах Рейнольдса.— М.: Мир, 1976.
11. Франк-Каменецкий Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике.— М.: Наука, 1967.
12. Бровинская И. П. // Archiwum procesow spalania.— 1974.— 5, N 5.— P. 145—162.

г. Тюмень

Поступила в редакцию 21/VI 1989,  
после доработки — 14/IX 1989

УДК 536.46

Т. П. Пушкарева, В. И. Быков

### ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МОДЕЛИ ГОРЕНИЯ СМЕСИ ДВУХ УГЛЕВОДОРОДОВ В ПРОТОЧНОМ РЕАКТОРЕ ИДЕАЛЬНОГО СМЕШЕНИЯ

Для модели горения смеси двух углеводородов проведен детальный параметрический анализ локальных бифуркаций стационарных состояний. Построены зависимости стационарных состояний от различных параметров. На основе использования спецификации задачи уравнения бифуркационных кривых выписаны в явном виде.

Исследованию динамических процессов горения смесей углеводородов посвящено значительное число работ. Например, в холодных пламенах экспериментально обнаружен ряд критических явлений — множественность стационарных состояний, автоколебания и т. п. [1—5]. В [6] предложена математическая модель, качественно описывающая процесс холоднопламенного горения смеси *n*-гептана и изооктана, протекающего в режиме осцилляций. Показано, что характеристики автоколебаний хорошо коррелируют с составом реакционной смеси и могут служить основой для экспресс-методики определения качества реальных топлив — октанового числа. В [6] условия существования автоколебаний найдены из требования, чтобы единственная стационарная точка соответствующей математической модели была неустойчивой.

Настоящая работа посвящена детальному параметрическому анализу общей модели горения смеси двух веществ в проточном реакторе идеального смешения. Рассматриваемая математическая модель представляет собой систему трех нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений. Для ее параметрического анализа подходы, развитые в [7, 8] для систем на плоскости, требуют некоторой модификации. В качестве примера, иллюстрирующего общую схему параметрического анализа, в дан-

ной работе рассматривается реакция холоднопламенного окисления смеси *n*-гептана и изооктана. Использование бифуркационных кривых, найденных для безразмерной модели, позволило построить области множественности стационарных состояний и автоколебаний в плоскости начальная температура смеси — концентрация кислорода, т. е. описать в плоскости реальных параметров область существования критических эффектов.

**Модель.** Рассматриваются две необратимые экзотермические реакции первого порядка



где  $A_1, A_2$  — реагенты (например, углеводороды);  $\Pi$  — продукты окисления. Для реактора идеального смешения в безразмерных параметрах математическая модель, соответствующая схеме (1), будет иметь вид (исходную модель и процедуру обезразмеривания см., например, в [6]):

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{d\tau} &= Da_1 \exp(\gamma_1(1 - 1/x_3))(1 - x_1) - x_1 = f_1, \\ \frac{dx_2}{d\tau} &= Da_2 \exp(\gamma_2(1 - 1/x_3))(1 - x_2) - x_2 = f_2, \\ \frac{dx_3}{d\tau} &= \beta_1 F_1(x_3)(1 - x_1) + \beta_2 F_2(x_3)(1 - x_2) + 1 - x_3 - s(x_3 - \bar{x}_3) = f_3. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $x_1, x_2$  — концентрации  $A_1, A_2$ ;  $x_3, \bar{x}_3, \tau$  — температуры и время;  $Da_i, \gamma_i, \beta_i, s (i = 1, 2)$  — параметры;

$$F_i(x_3) = Da_i \exp(\gamma_i(1 - 1/x_3)), \quad i = 1, 2. \quad (3)$$

Предположим, что начальные и входные условия для реактора совпадают. Тогда начальные условия для системы (2) запишутся так:

$$x_1(0) = x_2(0) = 0, \quad x_3(0) = (1 + s\bar{x}_3)/(1 + s). \quad (4)$$

При  $\bar{x}_3 = 1$  имеем  $x_3(0) = 1$ .

В работе [6] построена и проанализирована математическая модель, качественно описывающая процесс холоднопламенного горения смеси *n*-гептана и изооктана, протекающего в автоколебательном режиме. В данной работе проводится детальный параметрический анализ предложенной в [6] модели по схеме, описанной в [7, 8]: исследование зависимостей стационарных состояний от различных параметров, разбиение параметрического пространства на области, различающиеся числом и типом устойчивости стационарных состояний, анализ изменения этих областей при варьировании параметров, построение фазовых портретов, исследование временных зависимостей.

Математическая модель (2) представляет собой систему трех нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений с параметрами  $Da_i, \beta_i, \gamma_i, s, i = 1, 2$ . Определим стационарные состояния и их устойчивость. По сравнению с динамическими системами на плоскости процедура параметрического анализа требует в данном случае существенной модификации [9].

**Стационарные состояния и локальная устойчивость.** Приравнявая правые части уравнений системы (2) к нулю

$$f_i(x_1^*, x_2^*, x_3^*) = 0, \quad i = 1, 2, 3, \quad (5)$$

получим

$$x_i^* = \frac{F_i(x_3^*)}{1 + F_i(x_3^*)}, \quad i = 1, 2. \quad (6)$$

Чтобы определить  $x_3^*$ , запишем уравнение  $f_3 = 0$  в виде

$$F(x_3) = P(x_3), \quad (7)$$

где  $F(x_3)$  — функция тепловыделения;  $P(x_3)$  — функция теплоотвода:

$$F(x_3) = \frac{\beta_1 F_1(x_3)}{1 + F_1(x_3)} + \frac{\beta_2 F_2(x_3)}{1 + F_2(x_3)}, \quad P(x_3) = (1 + s)(x_3 - 1). \quad (8)$$

Область решения системы (5):

$$\Omega = \{x_1, x_2, x_3: 0 \leq x_1 \leq 1, 0 \leq x_2 \leq 1, 1 \leq x_3 \leq x_3^\infty\},$$

$$x_3^\infty = (\beta_1 F_1(\infty) + \beta_2 F_2(\infty) + 1 + s)/(1 + s) \text{ (см. [6])}.$$

Область  $\Omega$  есть  $\omega$ -инвариантное множество. Это означает, что в  $\Omega$  существует, по крайней мере, одно стационарное состояние (см., например, [10]). Число стационарных состояний системы (5) при различных параметрах исследуется с помощью классической диаграммы Семенова. В [6] показано, что оно единственно, если выполнено неравенство

$$P' = 1 + s > F'(x_3^*). \quad (9)$$

Как известно, тип устойчивости стационарного состояния определяется корнями характеристического уравнения

$$\lambda^3 + \sigma\lambda^2 + \delta\lambda + \Delta = 0, \quad (10)$$

$$\sigma = -(a_{11} + a_{22} + a_{33}), \quad (11)$$

$$\delta = \begin{vmatrix} a_{11} & 0 \\ 0 & a_{22} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} a_{11} & a_{13} \\ a_{31} & a_{33} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}, \quad (12)$$

$$\Delta = - \begin{vmatrix} a_{11} & 0 & a_{13} \\ 0 & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}, \quad (13)$$

$$a_{11} = -(1 + F_1(x_3^*)), \quad a_{13} = \gamma_1(1 - x_1^*)F_1(x_3^*)/(x_3^*)^2,$$

$$a_{23} = \gamma_2(1 - x_2^*)F_2(x_3^*)/(x_3^*)^2, \quad a_{22} = -(1 + F_2(x_3^*)), \quad a_{31} = -\beta_1 F_1(x_3^*),$$

$$a_{32} = -\beta_2 F_2(x_3^*), \quad a_{33} = \beta_1 a_{13} + \beta_2 a_{23} - 1 - s.$$

Чтобы определить условия неустойчивости, воспользуемся критерием Рауса — Гурвица. Число корней уравнения (10) с положительной действительной частью равно числу перемен знака в последовательности

$$1, \sigma, (\sigma\delta - \Delta)/\sigma, \Delta. \quad (14)$$

Так как при выполнении условия (9)  $\Delta > 0$ , то в последовательности (14) либо нет перемен знака, либо их две, т. е. единственным стационарным состоянием может быть устойчивый узел или седло (неустойчивое состояние). В области  $\Omega$  существуют автоколебания, если система (5) имеет единственное неустойчивое стационарное состояние.

Для построения параметрических зависимостей выделим из множества параметров один, например  $Da_1$ . Уравнение (7) запишем в виде

$$G(x_3, Da_1) = F(x_3, Da_1) - P(x_3, Da_1). \quad (15)$$

Воспользуемся тем, что параметр  $Da_1$  входит в (15) линейно, и запишем (15) так:

$$Da_1 = g(x_3). \quad (16)$$

Получаем зависимость, обратную искомой. Из графика функции  $g(x_3)$  для любого фиксированного  $Da_1$  легко найти значение  $x_3^*$ . Аналогичным образом строятся зависимости стационарного состояния от других параметров:

$$Da_1(x_3) = \frac{(1 + s)(x_3 - 1)(1 + F_2) - \beta_2 F_2}{\beta_1 \theta_1 + F_2 \theta_1 (\beta_1 + \beta_2) - \theta_1 (1 + s)(x_3 - 1)(1 + F_2)}, \quad (17)$$

$$\beta_1(x_3) = \frac{(1 + s)(x_3 - 1)(1 + F_1 F_2 + F_1 + F_2) - \beta_2 F_1 F_2 - \beta_2 F_2}{F_1(1 + F_2)},$$

$$\begin{aligned} \theta_i &= \exp(\gamma_i(1 - 1/x_3)), \quad F_i = F_i(x_3), \quad i = 1, 2, \\ \gamma_1(x_3) &= (i - i/x_3)^{-1} \ln \frac{(1+s)(x_3-1)(1+F_2) - \beta_2 F_2}{\beta_1 Da_1 + F_2(\beta_1 + \beta_2) Da_1 - Da_1(1+s)(x_3-1)(1+F_2)}, \\ s = s(x_3) &= \frac{\beta_1 F_1(1+F_2) + \beta_2 F_2(1+F_1) - (x_3-1)(1+F_1+F_2+F_1 F_2)}{(x_3-1)(1+F_1+F_2+F_1 F_2)}. \end{aligned}$$

Выражения для  $Da_2(x_3)$ ,  $\beta_2(x_3)$ ,  $\gamma_2(x_3)$  подобны выражениям для  $Da_1(x_3)$ ,  $\beta_1(x_3)$ ,  $\gamma_1(x_3)$  соответственно.

**Область множественности.** В плоскости двух параметров, например  $(s, \beta_1)$ , выделим области, которые отличаются друг от друга по числу стационарных состояний. Как сказано выше, необходимое и достаточное условие единственности стационарного состояния — выполнение (9),  $\Delta > 0$  [6]. Значит, кривая  $L_\Delta: \Delta = 0$  является границей, отделяющей области единственных и множественных стационарных состояний. Для построения линии  $L_\Delta$  необходимо решить систему

$$f_i(x_1, x_2, x_3, s, \beta_1) = 0, \quad (18)$$

$$\Delta(x_1, x_2, x_3, s, \beta_1) = 0, \quad i = 1, 2, 3,$$

где  $\Delta$  определяется по (13). Заменяя первые три уравнения системы (18) выражением (15), получаем

$$G(x_3, s, \beta_1) = 0, \quad \bar{\Delta}(x_3, s, \beta_1) = 0. \quad (19)$$

Из первого выражения системы (19) по (17) находим

$$s = \varphi(x_3, \beta_1). \quad (20)$$

Подставив (20) во второе уравнение системы (19), получим

$$\beta_1 = \psi(x_3). \quad (21)$$

Таким образом, построение границы области множественности сводится к вычислению функции  $L_\Delta$ , задаваемой в параметрическом виде:

$$L_\Delta(s, \beta_1): \begin{cases} \beta_1 = \psi(x_3), \\ s = \varphi(x_3, \beta_1), \end{cases}$$

$x_3$  — параметр, изменяющийся от 1 до  $x_3^\infty$ ,

$$\begin{aligned} \psi(x_3) &= \frac{\beta_2 F_2(1+F_1)(\gamma_2(1-x_2)(x_3-1) - x_3^2)}{F_1(1+F_2)(x_3^2 - \gamma_1(1-x_1)(x_3-1))}, \\ \varphi(x_3, \beta_1) &= \frac{\beta_1 F_1(1+F_2) + \beta_2 F_2(1+F_1) - (x_3-1)(1+F_1+F_2+F_1 F_2)}{(x_3-1)(1+F_1+F_2+F_1 F_2)}. \end{aligned}$$

Полученные выражения позволяют достаточно просто исследовать изменение области, ограниченной кривой  $L_\Delta$ , при варьировании различных параметров. Например, расчеты показали, что рост  $\beta_2$  приводит к расширению области множественности, а при увеличении  $Da_2$  область сужается.

Аналогичным образом построены и проанализированы области множественности в плоскостях параметров  $(\beta_2, \beta_1)$ ,  $(Da_1, \beta_1)$ ,  $(Da_2, \beta_2)$ ,  $(\beta_2, s)$ . Так как  $\gamma_i$  входит во второе уравнение системы (19) нелинейно, выписать явный вид кривой  $L_\Delta$ , например в плоскости  $(\gamma_1, Da_2)$ , не удалось. Данная кривая построена путем многократного численного решения (19) при варьировании параметров  $\gamma_1$ ,  $Da_2$  и остальных фиксированных.

**Кривые нейтральности.** Чтобы в области единственных стационарных состояний выделить неустойчивые, нужно построить кривую нейтральности  $L_\sigma: \sigma = 0$ . Данная кривая получается с помощью решения системы

$$f_i(x_1, x_2, x_3, s, \beta_1) = 0, \quad \sigma(x_1, x_2, x_3, s, \beta_1) = 0, \quad (22)$$

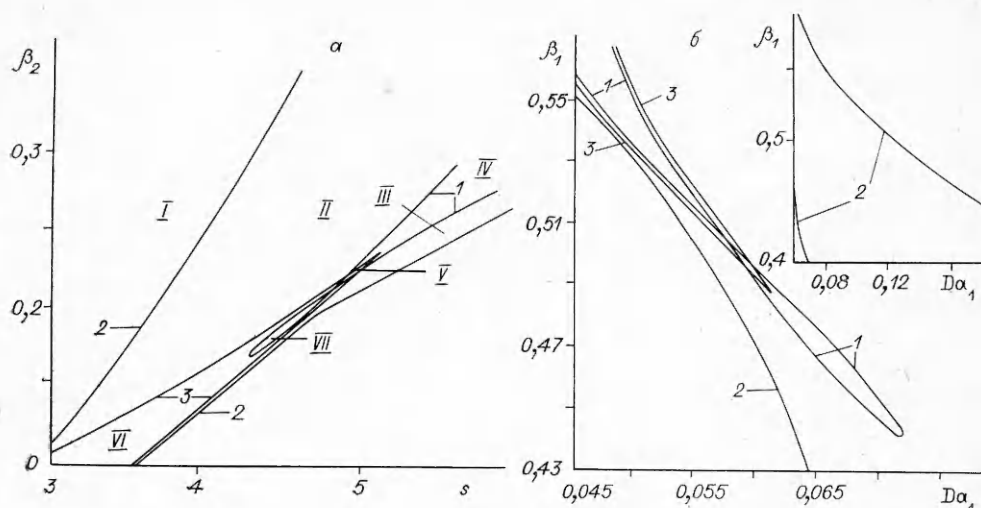


Рис. 1. Разбиение бифуркационными кривыми плоскостей;  $\gamma_1 = 43.65$ ,  $\gamma_2 = 38.52$ ,  $Da_2 = 0.44$ . а —  $(s, \beta_2)$ ,  $\beta_1 = 0.55$ ,  $Da_1 = 0.057$ ; б —  $(Da_1, \beta_1)$ ,  $s = 4.49$ ,  $\beta_2 = 0.1578$ . 1 — кривая  $L_\sigma$ ; 2 — кривая  $L_\xi$ ; 3 — кривая  $L_\Delta$ .

$\sigma$  определяется по (11). Заменяем первые три уравнения (22) уравнением (15):

$$G(x_3, s, \beta_1) = 0, \quad \bar{\sigma}(x_3, s, \beta_1) = 0. \quad (23)$$

Решая эту систему подобно (19), получаем параметрическое задание кривой  $L_\sigma$ :

$$L_\sigma(s, \beta_1): \begin{cases} \beta_1 = \psi_1(x_3), \\ s = \varphi(x_3, \beta_1), \end{cases}$$

$x_3 \in [1, x_3^\infty]$  — параметр,

$$\psi_1(x_3) = \frac{A(x_3 - 1)(\beta_2 \gamma_2 F_2 (1 - x_2) - x_3^2 (F_1 + F_2) - x_3^2 (2(x_3 - 1)A + \beta_2 F_2 (1 + F_1)))}{x_3^2 F_1 (1 + F_2) - \gamma_1 F_1 (1 - x_1)(x_3 - 1) \cdot A},$$

$$A = 1 + F_1 + F_2 + F_1 F_2.$$

Варьирование различных параметров показало, что при увеличении  $Da_2$  область, ограниченная линией  $L_\sigma$ , расширяется. Такой же результат наблюдается и при росте  $\beta_1$ . Аналогично построена кривая  $L_\sigma$  в параметрических плоскостях  $(\beta_2, \beta_1)$ ,  $(Da_1, \beta_1)$ ,  $(Da_2, \beta_2)$ ,  $(\beta_2, s)$ .

Как следует из анализа последовательности (14), построение только кривых  $L_\Delta$  и  $L_\sigma$  не дает еще полной информации об устойчивости стационарных состояний. Необходимо исследование разбиения плоскости параметров кривой  $L_\xi$ :  $(\sigma\delta - \Delta)/\sigma = 0$ . Получить в явном виде уравнение этой линии невозможно из-за нелинейности выражения  $(\sigma\delta - \Delta)/\sigma = 0$  относительно параметров. Поэтому кривая  $L_\xi$  построена численно. На рис. 1 приведены разбиения плоскостей параметров  $(Da_1, \beta_1)$  и  $(s, \beta_2)$  бифуркационными кривыми  $L_\Delta$ ,  $L_\sigma$ ,  $L_\xi$ . Видно, что в рассмотренном диапазоне изменения параметров область, ограниченная кривой  $L_\xi$ , больше областей, отвечающих  $L_\Delta$  и  $L_\sigma$ , т. е. с большей вероятностью автоколебания возникают при одном неустойчивом стационарном состоянии.

Явный вид кривых локальных бифуркаций  $L_\Delta$ ,  $L_\sigma$  и  $L_\xi$  в различных плоскостях безразмерных параметров позволяет достаточно просто строить эти кривые и в плоскостях реальных размерных параметров. Для схемы (1) построены области множественности стационарных состояний и их устойчивости в плоскости  $(T_0, c)$  (рис. 2), где  $T_0$  — начальная температура в реакторе;  $c$  — концентрация кислорода в топливно-воздушной смеси *n*-гептана и изооктана [6]. Кривая  $L_\xi$  почти совпадает с  $L_\sigma$  до 500 К и увеличивает область единственных неустойчивых состояний до 590 К. Кривые, представленные на рис. 2, отвечают реальным условиям

Рис. 2. Области множественности стационарных состояний и их устойчивости в плоскости размерных параметров  $T_0, c$  (моль/см<sup>3</sup>).

проведения эксперимента по холоднотемпературному горению смеси двух углеводородов в сферическом реакторе [5]. Все значения размерных параметров при построении параметрического портрета в плоскости  $(T_0, c)$  взяты из [6]. Пересчет бифуркационных кривых на этой плоскости осуществлен из плоскости безразмерных параметров  $Da_1, \beta_1$ , в которые  $T_0, c$  входят как сомножители:

$$Da_1 = Vk_1(T_0)c/q, \quad \beta_1 = (-\Delta H_1)x_1^0/(\rho c_p T_0),$$

где  $k_1(T_0)$  — константа скорости реакции;  $V$  — объем реактора;  $q, \rho, c_p$  — объемный расход, плотность, теплоемкость реакционной смеси;  $-\Delta H_1$  — теплота реакции;  $x_1^0$  — концентрация изооктана на входе в реактор. Переход к безразмерным величинам см. в [6].

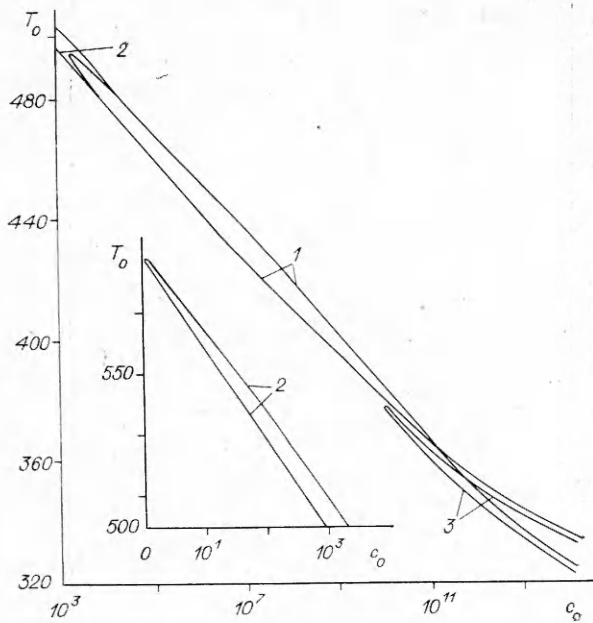
Для реальных значений  $c$  условия существования автоколебаний определяются областью  $(T_0, c)$ , ограниченной кривой  $L_\Delta$ . Множественность стационарных состояний, отвечающая  $L_\Delta$ , возможна лишь при пониженных температурах и слишком больших концентрациях кислорода.

**Фазовые портреты.** Из рис. 1 видно, что бифуркационные кривые разбивают плоскость параметров на семь областей. Охарактеризуем каждую из них. В системе (2) одновременно могут существовать не более трех стационарных состояний. Устойчивыми могут быть либо одно, либо два из них. В системе (2) одновременно могут существовать не более трех вого состояния. При любых начальных значениях  $x_1(0), x_2(0), x_3(0)$  решения стремятся к нему, т. е. областью притяжения стационарного состояния является все множество  $\Omega$ .

Области II — IV отвечают наличию у системы единственного неустойчивого стационарного состояния. Для них характерно существование автоколебаний, т. е. предельного цикла в пространстве  $x_1, x_2, x_3$ . Области V — VII содержат по три стационарных состояния и отличаются типом их устойчивости. Так, в области VI устойчиво лишь одно. В этом случае все множество  $\Omega$  является областью притяжения устойчивого состояния. В областях V и VII все три стационарных состояния неустойчивы. В этом случае в системе наблюдаются автоколебания. Все траектории «наматываются» на предельный цикл независимо от того, каковы начальные условия, т. е. область притяжения — это весь многогранник  $\Omega$ .

Фазовые портреты строились путем многократного численного решения системы (2) при различных начальных значениях  $x_1(0), x_2(0), x_3(0)$ . Проекция фазовых портретов, соответствующих областям I, II, VI, VII, приведены на рис. 3.

**Временные зависимости.** При рассмотрении временных зависимостей выделим случай, когда в системе (2) наблюдаются автоколебания. Поведение решений во времени при отсутствии колебаний легко понять из анализа фазовых портретов, соответствующих областям I и VI. Автоколебания безразмерных температуры и концентраций во времени носят



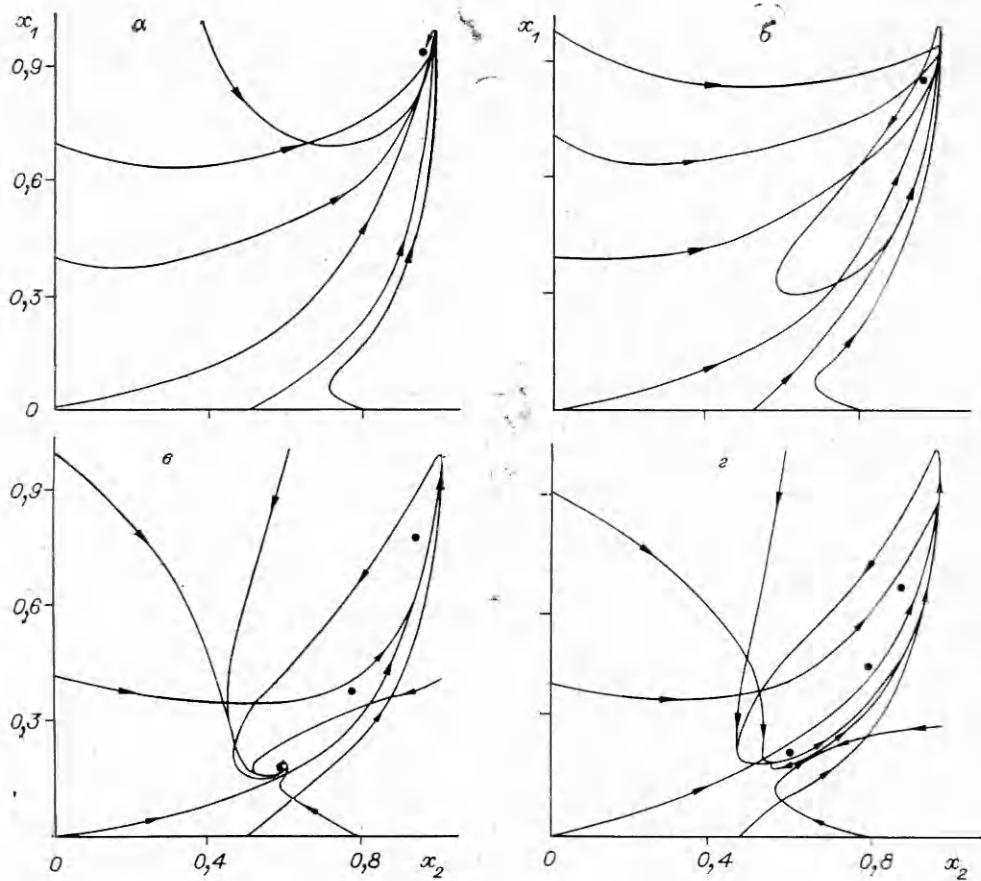


Рис. 3. Фазовые портреты системы (2);  $\gamma_1 = 43,65$ ,  $\gamma_2 = 38,52$ ,  $Da_1 = 0,057$ ,  $Da_2 = 0,44$ ,  $\beta_1 = 0,55$ .  
 а — область I ( $\beta_2 = 0,25$ ,  $s = 4$ ); б — область II ( $\beta_2 = 0,25$ ,  $s = 5$ ); в — область VI ( $\beta_2 = 0,1$ ,  $s = 4$ ); г — область VII ( $\beta_2 = 0,14$ ,  $s = 4,58$ ).

релаксационный характер — участки медленного движения в окрестности устойчивых ветвей кривой  $F(x_3)$  чередуются с участками быстрого движения, отвечающего переходу из окрестности одной устойчивой ветви  $F(x_3)$  в окрестность другой.

Исследована зависимость характеристик автоколебаний от различных параметров. Так, увеличение  $s$  приводит к росту как амплитуды, так и периода колебаний (рис. 4, а). Следует отметить, что колебания наблюдаются лишь в определенных интервалах значений параметров. При

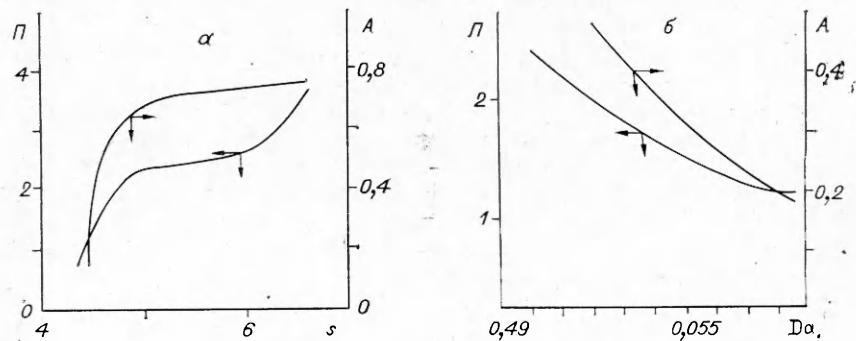


Рис. 4. Зависимости амплитуды и периода колебаний от параметров  $s$  (а) и  $Da_1$  (б);  $Da_2 = 0,44$ ,  $\beta_1 = 0,55$ ,  $\beta_2 = 0,25$ ,  $\gamma_1 = 43,65$ ,  $\gamma_2 = 38,52$ .  
 а —  $Da_1 = 0,057$ ; б —  $s = 5$ .

$s = 6, 7$  колебания скачком исчезают. Варьирование  $Da_1$  приводит к обратным зависимостям: с ростом  $Da_1$  период и амплитуда колебаний уменьшаются (рис. 4, б).

**Заключение.** Для модели, предложенной в [6], проведен детальный параметрический анализ локальных бифуркаций стационарных состояний. Построены зависимости стационарных состояний от различных параметров. На основе использования специфики задачи уравнения бифуркационных кривых выписаны в явном виде. Это позволило избежать трудоемкой процедуры многократного численного решения системы нелинейных уравнений (2) и построить области множественности и устойчивости в плоскости реальных размерных параметров. Даны фазовые портреты. Исследована зависимость характеристик автоколебаний от различных параметров.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мансуров З. А., Матафонов А. А., Пестерев В. И. Осцилляции в холодных пламенах бутана // Хим. физика.— 1988.— 7, № 8.— С. 1152.
2. Манташян А. А., Бернатосян С. Г. Явление осцилляции при окислении пропана, пропилена и их смесей // Хим. физика.— 1983.— 2, № 8.— С. 1064.
3. Гриффитс Дж. // Колебания и бегущие волны в химических системах.— М.: Мир, 1988.
4. Грей П., Скотт С. // Там же.— С. 532.
5. Степанский Я. Ю., Яблонский Г. С., Быков В. И. Исследование зависимостей характеристик процесса холоднопламенного окисления углеводородных смесей от их октановых чисел // ФГВ.— 1982.— 18, № 1.— С. 57.
6. Быков В. И., Пушкарева Т. П., Степанский Я. Ю. Моделирование автоколебаний в процессе холоднопламенного горения смеси *n*-гептан — изооктан в реакторе идеального смешения // ФГВ.— 1987.— 25, № 2.— С. 21.
7. Быков В. И., Пушкарева Т. П. Бифуркации в простейших моделях химических осцилляций в кинетической области // Математические проблемы химической кинетики.— Новосибирск: Наука, 1989.
8. Быков В. И., Пушкарева Т. П. Параметрический анализ кинетических моделей простейших механизмов химических осцилляций // Математические методы в химической кинетике.— Новосибирск: Наука, 1990.
9. Вольтер Б. В., Сальников И. Е. Устойчивость режимов работы химических реакторов.— Л.: Химия, 1981.
10. Вольтер Б. В. Периферийная неустойчивость открытых систем // Теоретические основы химической технологии.— 1989.— 23.— С. 708.

г. Красноярск

Поступила в редакцию 27/VI 1990

УДК 536.46

*Е. А. Борисова, Н. Г. Верникова, Б. Г. Ефимов,  
Л. А. Захлязьминский, С. С. Ключин, П. Н. Кузьяев*

#### ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ НА ХАРАКТЕР ГОРЕНИЯ В ПОТОКЕ ВОЗДУХА

Показано, что параметром, определяющим горючесть титановых сплавов, может служить критическая скорость обдува потоком воздуха. Получено, что в режиме горения, когда скорость окисления определяется скоростью диффузии кислорода через продукты реакции, находящиеся в расплаве, зависимость скорости горения от скорости обдува качественно аналогична режиму газофазного ограничения окисления в пограничном слое воздуха. Выявлено сильное влияние растворенного в титане водорода на горение.

Преимущества титановых сплавов как конструкционного материала хорошо известны — это высокая удельная прочность и коррозионная стойкость. Однако в отличие от алюминиевых сплавов и сталей в определенных условиях они горят в воздушной среде. Например, при аварии газотурбинного двигателя может наблюдаться самозагорание титановых узлов в парах трения, которые при этом возникают.