

Автор выражает благодарность ведущему инженеру ОАО «Чусовской металлургической завод» Н. Ф. Таланцеву за полезные обсуждения.

Библиографические ссылки

1. Пархиловский И. Г. Автомобильные листовые рессоры. – М. : Машиностроение, 1978. – 232 с.
2. Mathematical modelling of the foot prosthesis elastic element under bending / М. А. Osipenko [etc.] // Russian Journal of Biomechanics. – 2001. – Vol. 5. – No. 2. – P. 18–29.
3. Глух Б. А. Бидерман В. Л. Рессоры листовые // Машиностроение. Энциклопедический справочник. – Т. 2. – М. : Машгиз, 1948. – С. 723–739.
4. Расчеты на прочность в машиностроении / С. Д. Пономарев [и др.]. – Т. 1. – М. : Машгиз, 1956. – 884 с.
5. Феодосьев В. И. Избранные задачи и вопросы по сопротивлению материалов. – М. : Наука, 1973. – 400 с.
6. Няшин Ю. И., Осипенко М. А., Рудаков Р. Н. К теории изгиба листовой рессоры. – Изв. РАН МТГ. – 2002. – № 6. – С. 134–143.

7. Osipenko M. A., Yu. I. Nyashin, R. N. Rudakov. A contact problem in the theory of leaf spring bending // International Journal of Solids and Structures. – 2003. – No. 40. – P. 3129–3136.

8. Осипенко М. А., Брынских С. И. Отыскание толщин листов равнонапряженных листовых рессор // Вычислительная механика : Сб. науч. тр. – № 2. – Пермь, 2004. – С. 51–54.

9. Заявка на изобретение РФ. Комбинированная листовая рессора / И. Н. Губайдуллин, Н. Ф. Таланцев, В. Н. Езубченко, Т. И. Морозова. № 94028498/28; заявл. 28.07.1994; опубл. 20.03.1996.

10. Осипенко М. А., Таланцев Н. Ф. О свойствах коэффициента использования материала листовой рессоры // Изв. вузов. Поволжский регион. – 2009. – № 2(10). – С. 134–144.

11. Работнов Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела. – М. : Наука, 1988. – 711 с.

12. ГОСТ Р 51585–2000. Рессоры листовые автомобильных транспортных средств. – М. : Изд-во стандартов, 2000. – 19 с.

M. A. Osipenko, PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, Perm National Research Polytechnic University

Analytical Calculation of Static Bending of Two-Leaf Spring with the Parabolic Profile of the Short Leaf

The analytical solution of the contact problem for two-leaf spring bending is obtained. The long leaf has the constant profile, while the short leaf has the parabolic profile. Three possible contact patterns are found out: the contact at one point at the tip of the short leaf, the contact along the whole short leaf, the contact along the short leaf segment. The obtained solution allows calculating the bending stresses at leaves and the material utilization coefficient.

Key words: two-leaf spring, bending, parabolic profile, contact problem, analytical solution.

УДК 544.4: 519.6: 538.971/971.3: 542.971

А. В. Мышлявцев, доктор химических наук, Омский государственный технический университет

М. Д. Мышлявцева, кандидат физико-математических наук, доцент, Омский государственный технический университет

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТИПА РЕШЕТКИ НА АВТОКОЛЕБАНИЯ СКОРОСТИ РЕАКЦИИ, ПРОТЕКАЮЩЕЙ ПО МЕХАНИЗМУ ЛЕНГМЮРА – ХИНШЕЛЬВУДА

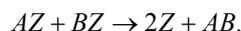
Изучено влияние латеральных взаимодействий между адсорбированными частицами и обратимости мономолекулярной адсорбции на автоколебания скорости реакции, протекающей по механизму Ленгмюра – Хиншельвуда, в случае треугольной решетки. В качестве модели адсорбционного слоя выбрана модель решеточного газа. Для вычисления правых частей кинетических уравнений использован метод трансфер-матрицы. Проведен анализ влияния типа решетки (квадратная, шестиугольная, треугольная) на возможность автоколебаний. Показано, что результаты, полученные для треугольной решетки, в целом аналогичны результатам для квадратной и шестиугольной решеток. Для трех типов решетки показана связь автоколебаний скорости реакции, возникающих как результат бифуркации Андронова – Хопфа, с упорядоченной плотной фазой.

Ключевые слова: латеральные взаимодействия, адсорбция, автоколебания, метод трансфер-матрицы.

Критические явления в гетерогенно-каталитических системах привлекают внимание исследователей с момента их экспериментального обнаружения в начале 70-х годов XX века [1–3]. Простейшим примером может служить реакция с суммарным стехиометрическим уравнением



протекающая по стандартному механизму Ленгмюра – Хиншельвуда [1, 4]



Здесь AZ , BZ – вещества на поверхности катализатора Z ; A_2 , B , AB – вещества в газовой фазе. Механизм Ленгмюра – Хиншельвуда (ЛХ) в первом приближении описывает окисление CO на поверхности металлов платиновой группы (Pt , Pd) и даже в случае иде-

ального изотермического адсорбционного слоя демонстрирует множественность стационарных состояний (ст. с.).

Кинетическая модель, соответствующая механизму ЛХ (II) для идеального адсорбционного слоя, в рамках закона действующих масс (ЗДМ) может быть записана в виде [1, 4, 5]

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = 2k_1 P_{A_2} (1-x-y)^2 - 2k_{-1} x^2 - k_3 xy, \\ \frac{dy}{dt} = k_2 P_B (1-x-y) - k_{-2} y - k_3 xy, \end{cases} \quad (1)$$

где x, y – концентрации поверхностных веществ AZ, BZ соответственно; k_1, k_2 – константы скоростей адсорбции газофазных веществ A_2, B ; k_{-1}, k_{-2} – константы скоростей десорбции соответственно; k_3 – константа скорости реакции третьей стадии в механизме (II); t – время; P_{A_2}, P_B – парциальные давления газофазных веществ A_2, B .

Решения системы уравнений (1), соответствующих механизму (II), определены в симплексе реакции $G = \{(x, y) \mid x \geq 0, y \geq 0, x + y \leq 1\}$. В случае необратимой адсорбции обоих веществ из газовой фазы ($k_{-1} = k_{-2} = 0$) система уравнений (1) всегда имеет два ст. с., принадлежащих границе симплекса G : $x_1 = 0, y_1 = 1$ и $x_2 = 1, y_2 = 0$ [1, 5]. Уже для идеального адсорбционного слоя возможно существование двух внутренних ст. с. В предположении идеальности адсорбционного слоя механизм (II) не может описывать автоколебания [6], и для этого необходимы более сложные механизмы [1, 2, 5, 7]. В условиях неидеальности адсорбционного слоя ситуация может измениться принципиально. В качестве модели неидеального адсорбционного слоя нами используется модель решеточного газа (МРГ), которая, как известно, является достаточно адекватным приближением для реального адсорбционного слоя [4].

Влияние латеральных взаимодействий между адсорбированными частицами на область множественности ст. с. и автоколебания скорости реакции, протекающей по механизму ЛХ, было изучено в случае квадратной [8–10], шестиугольной [11] и треугольной [12] решеток. В работе [13] был проведен сравнительный анализ влияния типа решетки (квадратная, шестиугольная, треугольная) на область множественности ст. с. в механизме ЛХ при необратимой адсорбции по обеим стадиям. Показано, что для необратимой адсорбции возможное число внутренних ст. с. достигает по крайней мере десяти в случае квадратной и треугольной решеток, шести в случае шестиугольной решетки. Для всех типов решетки показано, что если модель адсорбционного слоя имеет фазовую диаграмму, топологически эквивалентную фазовой диаграмме для идеального адсорбционного слоя, то данная модель имеет диаграмму кратности, топологически эквивалентную диаграмме кратности для идеального слоя. Для квадратной решетки верно и обратное утверждение [10]. Было по-

казано упрощение (усложнение) диаграмм кратности для шестиугольной (треугольной) решетки по сравнению с квадратной из-за сужения (роста числа) областей существования упорядоченных фаз и уменьшения (увеличения) по модулю средней энергии взаимодействия между адсорбированными частицами вследствие изменения координационного числа с 4 до 3 (с 4 до 6). Для каждого типа решетки для некоторых наборов энергий латеральных взаимодействий обнаружены автоколебания скорости реакции, возникающие как результат бифуркации Андронова – Хопфа, и показана связь автоколебаний с упорядоченной плотной фазой, существование которой обусловлено наличием притяжения между адсорбированными частицами разных сортов. В случае квадратной и шестиугольной решеток [10, 11] изучено влияние обратимости мономолекулярной адсорбции на область множественности ст. с. и автоколебания и показано, что с увеличением отношения константы скорости мономолекулярной десорбции к константе скорости реакции области множественности ст. с. упрощаются, и автоколебания подавляются.

Цель данной работы – изучение влияния латеральных взаимодействий между адсорбированными частицами, обратимости мономолекулярной адсорбции на область множественности ст. с. и на автоколебания скорости реакции в механизме ЛХ для случая треугольной решетки и сравнение с квадратной и шестиугольной решетками [10, 11].

Модель и метод

В качестве модели адсорбционного слоя мы будем рассматривать модель решеточного газа на треугольной решетке с двумя типами частиц при учете латеральных взаимодействий только ближайших соседей [12]. В рамках МРГ и теории переходного состояния в предположении термодинамической равновесности адсорбционного слоя могут быть получены точные выражения для скоростей элементарных процессов, таких как адсорбция, десорбция, реакция и т. д. [14]. Будем считать, что активированные комплексы не взаимодействуют с окружением. Вводя обозначения $u = 2k_1 P_{A_2} / k_3$, $v = k_2 P_B / k_3$, $w = 2k_{-1} / k_3$, $s = k_{-2} / k_3$, $\bar{\mu}_A = \mu_A / RT$, $\bar{\mu}_B = \mu_B / RT$, $\tau = k_3 t$, для реакции, протекающей по механизму ЛХ, получим следующую систему кинетических уравнений, формально не зависящую от типа решетки:

$$\begin{cases} \frac{dx}{d\tau} = p_{00} \left(u - w \exp(2\bar{\mu}_A) - \exp(\bar{\mu}_A + \bar{\mu}_B) \right), \\ \frac{dy}{d\tau} = \left(v - s \exp(\bar{\mu}_B) \right) (1-x-y) - p_{00} \exp(\bar{\mu}_A + \bar{\mu}_B), \end{cases} \quad (2)$$

где p_{00} – вероятность найти два соседних узла пустыми; R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура, К; μ_A, μ_B – химические потенциалы адсорбированных частиц A и B соответственно.

Система уравнений (2) по виду тождественна полученной ранее системе для квадратной решетки [10]. Разница между квадратной и треугольной ре-

шетками заключается в ином виде зависимостей $p_{00}(\overline{\mu}_A, \overline{\mu}_B)$, $x(\overline{\mu}_A, \overline{\mu}_B)$, $y(\overline{\mu}_A, \overline{\mu}_B)$, которые, как и ранее, могут быть определены лишь численно. Метод трансфер-матрицы [15–17] после незначительной модификации [16, 17] по-прежнему оказывается весьма эффективным для приближенного вычисления этих функций. Конкретный вид матричных элементов трансфер-матрицы рассматриваемой модели адсорбционного слоя приведен в работе [16]. Детали вычислительных алгоритмов можно найти в работах [16, 18–21]. Так как правые части системы уравнений (2) параметрически зависят от химических потенциалов $\overline{\mu}_A, \overline{\mu}_B$, целесообразно перейти от переменных (x, τ) , (y, τ) к переменным $(\overline{\mu}_A, \tau)$, $(\overline{\mu}_B, \tau)$. Легко показать, что для МРГ на полубесконечной решетке, рассматриваемой в МТМ, якобиан перехода невырожденный. Система уравнений (2) в новых переменных примет вид

$$\begin{cases} \frac{d\overline{\mu}_A}{d\tau} = \frac{1}{\Delta} \frac{\partial y}{\partial \overline{\mu}_B} (u - w \exp(2\overline{\mu}_A) - \exp(\overline{\mu}_A + \overline{\mu}_B)) p_{00} - \\ - \frac{1}{\Delta} \frac{\partial x}{\partial \overline{\mu}_B} ((v - s \exp(\overline{\mu}_B))(1 - x - y) - p_{00} \exp(\overline{\mu}_A + \overline{\mu}_B)) \\ \frac{d\overline{\mu}_B}{d\tau} = -\frac{1}{\Delta} \frac{\partial y}{\partial \overline{\mu}_A} (u - w \exp(2\overline{\mu}_A) - \exp(\overline{\mu}_A + \overline{\mu}_B)) p_{00} + \\ + \frac{1}{\Delta} \frac{\partial x}{\partial \overline{\mu}_A} ((v - s \exp(\overline{\mu}_B))(1 - x - y) - p_{00} \exp(\overline{\mu}_A + \overline{\mu}_B)), \end{cases} \quad (3)$$

где Δ – якобиан перехода от переменных (x, y) к переменным $(\overline{\mu}_A, \overline{\mu}_B)$.

Система дифференциальных уравнений (3), как и исходная система (2), является жесткой для многих значений параметров модели адсорбционного слоя и кинетических констант механизма ЛХ. При решении системы (3) нами использовался алгоритм (Kaps and Rentrop), реализующий метод Розенброка (Rosenbrock) с автоматическим выбором шага [22, 23]. Данный алгоритм позволяет получить решение жесткой системы дифференциальных уравнений (3) с приемлемой точностью не хуже чем 10^{-5} . Отметим, что машинное время в основном тратится на вычисление правых частей системы уравнений (3).

Результаты и обсуждение

Влияние латеральных взаимодействий и обратимости мономолекулярной адсорбции на область множественности стационарных состояний. Для анализа влияния латеральных взаимодействий и обратимости мономолекулярной адсорбции ($s \neq 0; w = 0$) на область множественности ст. с. в случае треугольной решетки для всех 27 наборов $\varepsilon_{AA}, \varepsilon_{AB}, \varepsilon_{BB}$ энергий латеральных взаимодействий ближайших соседей, которые принимали значения 10; –10; 0 кДж/моль, на плоскости $(\lg u; \lg v)$ строились диаграммы кратности при различных значениях s (начи-

ная с $s_0 = 10^{-12}$ до $s_1 > s_0$, при котором множественность ст. с. исчезала) при температуре $T = 500$ К и $M = 3$, где M – ширина бесконечной полосы, используемой в методе трансфер-матрицы. Далее ($a; b; c$) означает $\varepsilon_{AA} = a, \varepsilon_{AB} = b, \varepsilon_{BB} = c$ кДж/моль.

Результаты вычислений показывают, что число внутренних ст. с. меняется от одного и по крайней мере до одиннадцати. Как и в случае квадратной и шестиугольной решеток, области множественности ст. с. быстро уменьшаются с ростом параметра обратимости s . Полученные результаты аналогичны результатам для квадратной и шестиугольной решеток. В качестве иллюстрации на рис. 2 при различных значениях параметра обратимости s приведены диаграммы кратности на плоскости $(\lg u, \lg v)$ для модели (10; –10; 10) (при $s = 0$ см. рис. 1). Заметим, что множественность ст. с. исчезает при $s \approx 10^5$.

Влияние обратимости мономолекулярной адсорбции на автоколебания. Для анализа влияния обратимости мономолекулярной адсорбции ($s \neq 0; w = 0$) на автоколебания в реакции, протекающей по механизму ЛХ, в случае треугольной решетки при различных значениях s был проведен параметрический анализ системы (3) для девяти моделей адсорбционного слоя, характеризующихся притяжением между частицами различных сортов, и для моделей (10; 0; 0), (0; 0; 10), (10; 0; 10), у которых существует плотная упорядоченная фаза $(\sqrt{3} \times \sqrt{3})R30^\circ_{A_2B}$, которая, как было показано для необратимого случая [12], непосредственно связана с наличием автоколебания. Области с отрицательным дискриминантом характеристического уравнения (3) обнаружены при различных значениях s для восьми из девяти моделей адсорбционного слоя, характеризующихся притяжением между частицами различных сортов, кроме (–10; –10; –10). Предельные циклы обнаружены для тех же четырех наборов, как и в случае необратимой адсорбции: (–10; –10; 0), (–10; –10; 10), (0; –10; 0), (0; –10; 10). В целом, как и в случае квадратной и шестиугольной решеток [10, 11], влияние обратимости на существование предельных циклов аналогично влиянию обратимости на область множественности ст. с., т. е. при увеличении параметра обратимости s автоколебания в системе подавляются. В случае квадратной (для моделей (0; –10; –10) и (10; –10; –10)) и шестиугольной (для модели (10; –10; 0)) решеток было показано, что при $s = 0$ автоколебания отсутствуют, а при умеренных значениях s они появляются, а при увеличении s они снова исчезают. В случае квадратной решетки было показано, что в некоторых случаях при росте параметра обратимости s вначале исчезает область множественности ст. с. и лишь потом автоколебания скорости реакции. В частности этот эффект наблюдался для моделей (–10; –10; 0) и (–10; –10; 10) при $s = 10^{-3}$. Данный эффект наблюдается в случае треугольной решетки для этих же моделей при $s = 10^{-4}$.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. Результаты, полученные для треугольной решетки, в целом аналогичны результатам для квадратной и шестиугольной решеток. Для механизма Ленгмюра – Хиншельвуда при учете неидеальности адсорбционного слоя и обратимости мономолекулярной адсорбции область множественности стационарных состояний претерпевает существенные изменения и зависит как от набора латеральных взаимодействий в адсорбционном слое, так и от отношения константы скорости мономолекулярной десорбции к константе скорости реакции.

2. Для некоторых наборов латеральных взаимодействий обнаружены автоколебания скорости реакции, возникающие как результат бифуркации Андронова – Хопфа. Для треугольной решетки наличие автоколебаний скорости реакции непосредственно связано с существованием плотной упорядоченной фазы $(\sqrt{3} \times \sqrt{3})R30^\circ_{AB}$, в то время как для квадратной и шестиугольной решеток – с существованием плотной упорядоченной фазы $C(2 \times 2)_{AB}$.

Библиографические ссылки

- Comprehensive chemical kinetics / V. I. Bykov, V. I. Elokhin, A. N. Gorban, G. S. Yablonskii // Kinetic models of catalytic reactions (Ed. R.G. Compton). – Vol. 32. – Amsterdam : Elsevier, 1991.
- Slinko M. M., Jaeger N. I. Oscillatory heterogeneous catalytic systems // Studies in Surface Science and Catalysis. – Vol. 86. – Amsterdam : Elsevier, 1994.
- Zhdanov V. P. Monte-Carlo simulations of oscillations, chaos and pattern formation in heterogeneous catalytic reactions // Surf. Sci. Rep. – 2002. – Vol. 45. – P. 231.
- Боресков Г. К. Гетерогенный катализ. – М. : Наука, 1986. – 304 с.
- Горбань А. Н., Быков В. И., Яблонский Г. С. Очерки о химической релаксации. – Новосибирск : Наука, 1986. – 320 с.
- Bykov V. I., Yablonskii G. S., Kuznetzova T. V. Simple catalytic mechanism permitting a multiplicity of catalyst steady states // Reacting Kinetic and Catalysis Letters. – 1979. – Vol. 10. – No. 4. – P. 307–310.
- Яблонский Г. С., Быков В. И., Елохин В. И. Кинетика модельных реакций гетерогенного катализа. – Новосибирск : Наука, 1984. – 250 с.
- Мышляцев А. В., Мышляцева М. Д. Диаграммы кратности для механизма Ленгмюра – Хиншельвуда в условиях неидеальности адсорбционного слоя. Необратимая адсорбция // Омский научный вестник. – 2005. – № 2(31). – С. 85–90.
- Мышляцев А. В., Мышляцева М. Д. Неидеальность адсорбционного слоя и автоколебания в механизме Ленгмюра – Хиншельвуда. Необратимая адсорбция // Омский научный вестник. – 2006. – № 1(34). – С. 57–60.
- Мышляцев А. В., Мышляцева М. Д. Латеральные взаимодействия в адсорбционном слое и критические явления в реакции, протекающей по механизму Ленгмюра – Хиншельвуда // Кинетика и катализ. – 2007. – Т. 48. – № 4. – С. 576–585.
- Мышляцев А. В., Мышляцева М. Д. Множественность стационарных состояний и автоколебания в механизме Ленгмюра – Хиншельвуда в случае шестиугольной решетки // Омский научный вестник. – 2006. – № 7(43). – С. 62–68.
- Мышляцев А. В., Мышляцева М. Д. Множественность стационарных состояний и автоколебания в механизме Ленгмюра – Хиншельвуда в случае треугольной решетки. Необратимая адсорбция // Омский научный вестник. – 2006. – № 6(41). – С. 60–67.
- Мышляцев А. В., Мышляцева М. Д. Сравнительный анализ влияния типа решетки на область множественности в механизме Ленгмюра – Хиншельвуда в условиях неидеальности адсорбционного слоя // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2007. – Т. 50. – № 11. – С. 104–109.
- Жданов В. П. Элементарные физико-химические процессы на поверхности. – Новосибирск : Наука, 1988. – 296 с.
- Myshlyavtsev A. V., Zhdanov V. P. The effect of near-est-neighbour and next-nearest-neighbour lateral interactions on thermal desorption spectra // Chem. Phys. Lett. – 1989. – Vol. 162. – No. 1, 2. – P. 43–46.
- Мышляцев А. В., Мышляцева М. Д. Вычислительные аспекты метода трансфер-матрицы. – Кызыл : ТувиКОПР СО РАН, 2000. – 101 с.
- Быков В. И., Мышляцев А. В., Слинко М. Г. Применение метода трансфер-матрицы для описания процессов на поверхности катализатора // Доклады Академии наук. – 2002. – Т. 384. – № 5. – С. 650–654.
- Runnels L. K., Combs L. L. Exact finite method of lattice statistics. I. Square and triangular lattice gases of hard molecules // J. Chem. Phys. – 1966. – Vol. 45. – No. 7. – P. 2482–2492.
- The effect of three-body interactions on thermal desorption spectra A. V. Myshlyavtse, J. L. Sales, G. Zgrablich, V. P. Zhdanov // J. Statistical Phys. – 1990. – Vol. 58. – No. 5-6. – P. 1029–1039.
- Myshlyavtsev A. V., Dongak M. D. (Myshlyavtseva). Statistics of adsorption on top and bridge sites of a square lattice: transfer matrix approach // J. Stat. Phys. – 1997. – Vol. 87. – No. 3-4. – P. 593–607.
- Bartlet N. C., Einstein T. L., Roelofs L. D. Transfer-matrix approach to estimating coverage discontinuities and multicritical point positions in two-dimensional lattice gas phase diagram // Phys. Rev. B. – 1986. – Vol. 34. – No. 3. – P. 1616–1625.
- Shampine L. F., Gordon M. K. Computer Solution of Ordinary Differential Equations. – The Initial Value Problem, San-Francisco : W.H. Freeman, 1975.
- Press W. H., Teukolsky S. A., Vetterling W. T., Flannery B. P. Numerical Recipes in Fortran 77, The Art of Scientific Computing, Second Edition, Vol. 1, Cambridge University Press, 1992.

A. V. Myshlyavtsev, DSc in Chemistry, Omsk State Technical University

M. D. Myshlyavtseva, PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, Omsk State Technical University

Analysis of Lattice Type Effect on Self-Sustained Oscillations of Reaction Rate for Langmuir-Hinshelwood Mechanism

The effect of lateral interactions between the adsorbed particles and reversibility of monomolecular adsorption on self-sustained oscillations of reaction rate for Langmuir-Hinshelwood mechanism has been studied in case of a triangular lattice. A lattice gas model was considered as a model of the adsorbed layer. Transfer matrix method has been used to calculate right hand parts of kinetic equations. Analysis of the lattice type (square, honeycomb, triangular) effect on possible self-sustained oscillations has been done. It was shown that the obtained results for triangular lattice are rather close to those for the square and honeycomb lattices. The relation between self-sustained oscillations of the reaction rate arising due to An-Drnov-Hopf bifurcation and the ordered dense phase was shown for all three types of lattices.

Key words: lateral interactions, adsorption, self-sustained oscillations, transfer matrix method.

УДК 629.7 : 533.6

О. В. Мищенко, кандидат физико-математических наук, доцент, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

И. В. Черепов, аспирант, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

ФУРЬЕ-АНАЛИЗ В ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЗАДАЧАХ ПРИ РАСЧЕТЕ ТЕПЛОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Рассматривается методика оценки энергии и частоты колебаний, возникающих в камере сгорания теплового двигателя на нестационарных режимах его работы. Методика основана на решении газодинамической задачи в объеме камеры сгорания в нестационарной постановке с последующим фурье-анализом результатов расчетов.

Ключевые слова: тепловой двигатель, термогазодинамические процессы, периодические колебания, спектральный фурье-анализ.

Работа любого объекта техники может сопровождаться периодическими колебаниями, частота которых определяется возмущающими воздействиями на этот объект. Частный случай, при котором период (частота) колебаний совпадает с собственными колебаниями объекта, в технике называется явлением резонанса. Резонансные явления могут представлять опасность и привести, например, к механическому разрушению каких-либо деталей или узлов, входящих в состав технического объекта. Собственные частоты колебаний могут быть установлены специальными математическими средствами. В частности для теплового двигателя методика расчета собственных частот колебаний термогазодинамических параметров (давления, скорости газовой фазы и т. п.) излагается в [1, 2].

Ниже рассматривается методика, позволяющая оценить фактически реализующиеся в камере сгорания теплового двигателя частоты колебаний термогазодинамических параметров. Методика применяется для двигательных установок, конструктивная схема которых представлена на рис. 1. В состав двигателей входит несколько основных модулей [3, 4]. Источником массопродуктов, используемых для создания управляющих усилий, являются твердотопливные заряды. Работа двигательной установки начинается с момента включения воспламенительного устройства, продукты сгорания которого прогревают топливный заряд и воспламеняют его. Истечение продуктов сгорания организуется через сопловые блоки.

Установить фактический характер изменения термогазодинамических параметров во внутреннем объеме теплового двигателя позволяет математическая модель, основанная на одномерном представлении о движении продуктов в камере сгорания [5, 6].

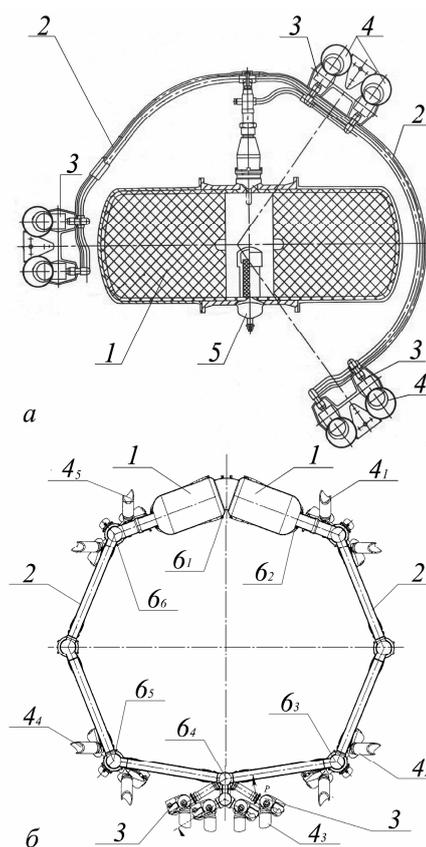


Рис. 1. Примеры конструктивных схем двигательных установок: 1 – твердотопливный газогенератор; 2 – газоходы; 3 – регуляторы расхода и привод; 4, 4₁₋₅ – сопловые блоки; 5 – воспламенительное устройство, 6₁₋₆ – контрольные сечения

При построении математической модели внутрикамерных процессов во внутреннем объеме двига-