

относительно слабо зависит от используемых функций плотности распределения вероятностей, в задаче о воспламенении вид этих функций является определяющим. Наиболее обоснована «каноническая» модель, учитывающая перемежаемость и использующая аналитическое решение для плотности вероятности по турбулентной жидкости [12]. Сравнительный анализ существующих моделей несмешанности при использовании в качестве условия воспламенения появления максимума температуры покажет: 1) β -модель Сполдинга [11] непригодна для правильного описания задержки воспламенения; 2) модель несмешанности Шпиглера [2], хотя и дает результаты, близкие к результатам «канонической» модели (при специальном выборе постоянной), основана на ошибочных физических предположениях; хорошее соответствие носит случайный характер и объясняется компенсацией ошибок при аппроксимации источника; при варьировании начальных условий такой компенсации может и не быть; 3) γ -модель [6] завышает влияние турбулентности на задержку воспламенения.

Критерий, основанный на появлении максимума температуры, недостаточно обоснован и приводит на примере γ -модели к существенному (примерно в 2 раза) завышению влияния турбулентности на задержку воспламенения по отношению к обычным для теплового механизма критериям воспламенения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Громов В. Г., Ларин О. В., Левин В. А. Хим. физика, 1984, 3, 8, 1190.
2. Spiegler E., Wolfshtein M., Manheimer — Timmat Y. Acta Astronautica, 1976, 3, 3—4, 265.
3. Evans J. S., Schexnayder C. J. AIAA J., 1980, 18, 2, 188.
4. Баев В. К., Головичев В. И., Ясаков В. А. Двумерные турбулентные течения реагирующих газов.— Новосибирск: Наука, 1976.
5. Колесников О. М. ФГВ, 1985, 21, 1, 53.
6. Кузнецов В. Р. // Горение и взрыв.— М.: Наука, 1972.
7. Кузнецов В. Р., Лебедев А. В., Секундов А. Н. и др. // Горение гетерогенных и газовых систем.— Черногоровка, 1977.
8. Джонс У. // Методы расчета турбулентных течений.— М.: Мир, 1984.
9. Билджер Р. // Турбулентные течения реагирующих газов.— М.: Мир, 1983.
10. Борги Р. // Методы расчета турбулентных течений.— М.: Мир, 1984.
11. Khalil E. E., Spalding D. B., Whitelaw J. Intern. J. Heat and Mass Transfer, 1975, 18, 6, 775.
12. Кузнецов В. Р. Изв. АН СССР. МЖГ, 1972, 5, 86.
13. Кузнецов В. Р., Сабельников В. А. Турбулентность и горение.— М.: Наука, 1986.
14. Кузнецов В. Р. Изв. АН СССР. МЖГ, 1977, 3, 32.
15. Bashir J., Uberoi M. S. Phys. Fluids, 1975, 18, 4, 764.
16. Wygnanski I., Fiedler H. E. J. Fluid Mech., 1969, 38, 3, 577.
17. Shaughnessy E. J., Morton J. B. J. Fluid Mech., 1977, 80, 1, 129.
18. Becker H. A., Hottel H. S., Williams G. S. J. Fluid Mech., 1967, 30, 2, 285.
19. Мещеряков Е. А., Сабельников В. А. ФГВ, 1984, 20, 4, 45.
20. Расщупкин В. И., Секундов А. Н. Изв. АН СССР. МЖГ, 1976, 5.
21. Таунсенд А. А. Структура турбулентного потока с поперечным сдвигом.— М.: ИЛ, 1959.

Поступила в редакцию 5/VI 1987

УДК 541.124

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ И МЕХАНИЗМА ВОСПЛАМЕНЕНИЯ КАРБОРАНА-4

*В. Н. Калинин, Ю. К. Мужосеев, А. Б. Петрунин,
Е. С. Северин, В. Г. Слуцкий, А. М. Тереза,
С. А. Цыганов*

(Москва)

Все большее применение в различных отраслях народного хозяйства находят борсодержащие соединения и, в частности, клозо-карбораны или просто карбораны — вещества состава $C_2B_nH_{n+2}$ ($3 \leq n \leq 10$) и их производные. В связи с этим исследование закономерностей воспламенения

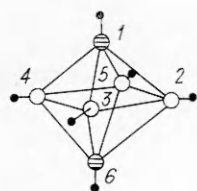


Рис. 1. Структура 1,6- $C_2B_4H_6$
(2-5 — В, 1, 6 — С, ● — Н).

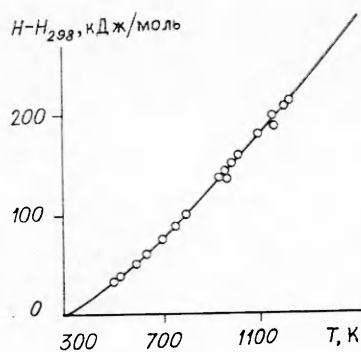


Рис. 2. Зависимость $H - H_{298}$
для 1,6- $C_2B_4H_6$.

подобных соединений представляет интерес для определения мер безопасности при обращении с ними. Приведенные в [1] характеристики воспламенения некоторых жидких органических производных карборана-10 за отраженными ударными волнами (УВ) в воздухе указывают на сопоставимость их реакционной способности при $T \sim 1000$ К с реакционной способностью газовых смесей типа бутан — воздух. Однако в литературе отсутствуют данные по газофазному воспламенению собственно карборанов. Помимо самостоятельного интереса наличие подобных данных может явиться отправной точкой для исследования механизма окисления указанного класса веществ.

Цель предлагаемой работы заключается в исследовании характеристик и механизма воспламенения одного из простейших карборанов — 1,6-карборана-4 (1,6- $C_2B_4H_6$) [2].

Молекула карборана-4 имеет структуру октаэдра, вершины которого занимают атомы бора и углерода (рис. 1). Подобная структура предполагает высокую степень делокализации электронов в бороуглеродном скелете, поэтому карборан-4, как и высшие карбораны, относится к квазиароматическим системам [3—5]. Взаимное расположение атомов углерода определяет наличие двух изомеров — 1,6- и 1,2- $C_2B_4H_6$. В предлагаемой работе исследуется 1,6- $C_2B_4H_6$.

Обладая при комнатной температуре давлением паров, близким к атмосферному, карборан-4 удобен для исследования в ударных трубах и установках адиабатического сжатия. Традиционная методика расчета температуры ударно-сжатого и сжатого поршнем газа требует данных по энтальпиям $H(T)$ компонентов смеси и их изменению с ростом температуры, в то время как для карборанов подобные данные в литературе отсутствуют. Поэтому в качестве предварительного шага в работе определена температурная зависимость энтальпии карборана-4 в интервале $500 \lesssim T \lesssim 1100$ К.

Предлагаемая методика экспериментального определения $H(T)$ в ударных трубах заключается в следующем. При заданной скорости ударной волны D расчет параметров ударно-сжатого газа основан на решении системы уравнений сохранения массы, импульса и энергии [6]. Эти параметры могут быть определены и в случае замены двух уравнений энергии (за падающей и отраженной волнами), содержащих $H(T)$, двумя экспериментально измеряемыми параметрами, например давлением за падающей волной p_2 и скоростью отраженной волны w_R . Выражения для температуры за падающей (T_2) и отраженной (T_5) УВ имеют вид

$$\frac{T_2}{T_1} = \pi \left(1 - \frac{\pi - 1}{M^2} \right), \quad M = D/a, \quad a^2 = p_1/\rho_1, \quad \pi = p_2/p_1,$$

$$\frac{T_5}{T_1} = \left[(\pi - 1) \left(1 + \frac{w_R}{D} \right) + \left(1 - \frac{\pi - 1}{M^2} \right) \right] \left[1 + \frac{D}{w_R} \frac{\pi - 1}{M^2} \right],$$

где p_1 , ρ_1 , T_1 — исходные параметры газа. Соответствующие T_2 и T_5 значения энтальпий получаются из уравнений энергии после подстановки

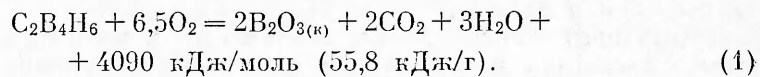
в них рассчитанных по p_2 и w_R параметров газа

$$\frac{H(T_2) - H(T_1)}{a^2} = (\pi - 1) \left(1 - \frac{\pi - 1}{2M^2} \right),$$

$$\frac{H(T_3) - H(T_1)}{a^2} = (\pi - 1) \left(1 + \frac{w_R}{D} \right).$$

Определенная температурная зависимость энтальпии карборана-4 представлена на рис. 2. Эксперименты проводили в трубе диаметром 3,8 см и длиной 3 м (секция низкого давления — 2 м). Скорости D , w_R и давление p_2 измеряли по сигналам пьезокерамических датчиков давления. Базы измерения D и w_R составляли $l_D = 375$ мм и $l_R = 69$ мм соответственно. Ударному сжатию подвергалась смесь $0,1C_2B_4H_6 + Ar$ при $p \sim 0,1$ МПа, $500 \leq T \leq 1100$ К. Максимальная температура ограничена требованием, чтобы время измерения скорости отраженной волны $\tau_R = l_R/w_R$ было существенно короче времени термического превращения (пиролиза) карборана τ_n за УВ ($\tau_R \ll \tau_n$); в экспериментах $\tau_R/\tau_n \leq 10^{-1}$. Для оценки точности метода сравнивались табличные и экспериментально определенные энтальпии пропана C_3H_8 (исследуемая смесь $0,1C_3H_8 + Ar$). Расхождение определенных по методике и табличных значений энтальпий C_3H_8 не превышает 5 %.

Основной этап работы связан с исследованием реакционной способности карборана-4 в воздушной среде (окислитель — кислород) [7]:



С этой целью определялась температурная зависимость задержки воспламенения $\tau(T)$ стехиометрической смеси карборана с «арговым воздухом» $O_2 + 3,76 Ar$. Замена азота воздуха на аргон не влияет существенным образом на величину τ (смена двухатомного инертного газа на одноатомный приводит к уменьшению τ не более чем в 1,5 раза), однако облегчает условия достижения повышенных температур. В области $T \geq 1000$ К временной интервал измерялся за отраженными УВ в ударной трубе, параметры которой описаны выше. За величину τ принимался временной интервал между приходом УВ к торцу трубы и началом резкого нарастания давления в торцевой части. Параметры газа за отраженными волнами рассчитывались по [6] с учетом полученной зависимости $H(T)$ для карборана и составляли $1400 > T > 800$ К, $0,05 < p < 0,2$ МПа, чему отвечает $10 < \tau < 1000$ мкс.

В области $T < 1000$ К опыты проводились в установке адиабатического сжатия, состоявшей из цилиндра диаметром 80 мм, в котором под действием сжатого воздуха из резерва двигался поршень со штоком и опорной гайкой, задающей требуемый ход поршня, максимальный ход — 200 мм. Давление регистрировалось пьезокварцевым датчиком. При известном давлении сжатия температура в центре сжимаемого объема рассчитывалась по закону адиабатического сжатия

$$\frac{p}{p_1} = \exp \int_{T_1}^T \frac{c_p(T) dT}{R T},$$

где $c_p(T)$ — теплоемкость при постоянном давлении; R — универсальная газовая постоянная; зависимость $c_p(T)$ для карборана определялась из приведенной на рис. 2 зависимости $H(T)$. За величину τ принимался временной интервал между моментом завершения сжатия и началом резкого нарастания давления в сжатом объеме; при этом $30 < \tau_c < 50$ мс, $0,5 < p < 2,0$ МПа, $550 < T < 700$ К, чему отвечает $10 < \tau < 100$ мс.

Обработка полученных данных показала, что воспламенение карборано-воздушной смеси обратно пропорционально давлению ($\tau \sim 1/p$), по-

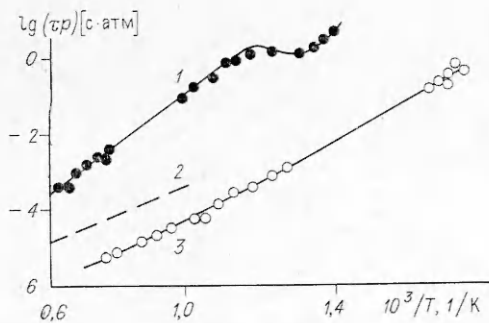


Рис. 3. Сравнение приведенных к атмосферному давлению задержек воспламенения стехиометрических воздушных (при замене N_2 на Ar) смесей карборана-4, пропана, водорода.

1 — $C_3H_8 + 5(O_2 + 3,76Ar)$; 2 — $H_2 + 0,5(O_2 + 3,76Ar)$; 3 — $C_2H_6 + 6,5(O_2 + 3,76Ar)$.

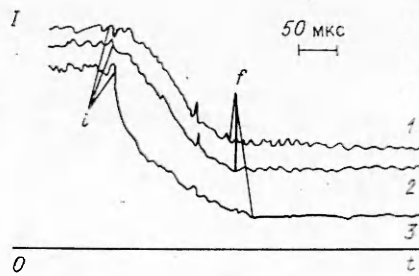
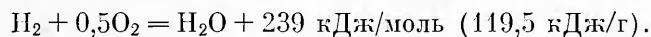
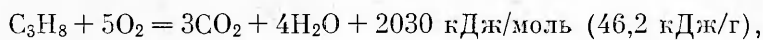


Рис. 4. Изменение интенсивности проходящего света I (отн. ед.) при пиролизе карборана-4 в смеси $0,01 C_2B_4H_6 + Ar$ при $T = 1540 K$.

λ , нм: 1 — 400; 2 — 300; 3 — 215; τ — приход отраженной ударной волны; f — завершение пиролиза.

этому результаты измерения $\tau(T)$ представлены на рис. 3 в виде приведенных к атмосферному давлению. Там же для сравнения показаны соответствующие зависимости стехиометрических смесей пропан — «аргоновый воздух» и водород — «аргоновый воздух» [8]:



Как следует из рис. 3, карборан-4 является сильнореакционным веществом. Воспламенение его воздушной смеси происходит на порядок быстрее водородовоздушной смеси и на три порядка быстрее углеводородовоздушных смесей. При этом эффективная энергия активации воспламенения карборано-воздушной смеси составляет $E_{к-возд} = 96(23)$ кДж(ккал)/моль, т. е. практически совпадает с энергией активации для водородовоздушных смесей $E_{H_2-возд} = 92(22)$ кДж(ккал)/моль [8] и примерно в 1,5 раза меньше соответствующей величины для систем пропан — воздух $E_{C_3H_8-возд} = 134(32)$ кДж(ккал)/моль.

Продолжение работы связано с выявлением основных моментов механизма окисления карборана-4. При выборе направления исследований принималось, что высокая реакционная способность борана [9], входящего в его состав. Однако непосредственно в карборане атомы бора экранированы атомами водорода (см. рис. 1), что затрудняет их контакт с кислородом. В связи с этим обращает на себя внимание пиролиз карборанов [10, 11], сопровождающийся выделением водорода и, таким образом, «оголением» бора.

Если предположить, что процесс «оголения» бора при пиролизе является лимитирующей стадией окисления, то при известном времени пиролиза τ_n для скорости тепловыделения в единице объема W_q на начальном этапе воспламенения можно записать

$$W_q \approx c_k Q / \tau_n, \quad (2)$$

где c_k — мольная концентрация карборана; Q — тепловыделение на моль карборана, принимавшееся для оценок равным тепловыделению при окислении до конечных продуктов реакции (1). В свою очередь, из уравнения теплового баланса следует

$$W_q \tau = c_p' \Delta T^*. \quad (3)$$

Здесь c_p' — теплоемкость единицы объема; $\Delta T^* = RT^2/E$ — предвзрывной разогрев [12], причем E отвечает энергии активации тепловыделения,

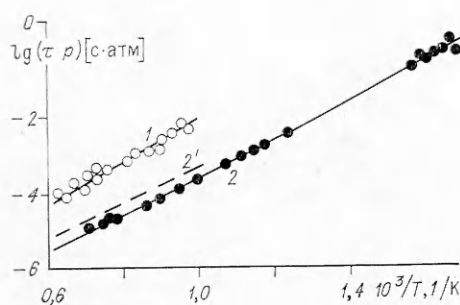


Рис. 5. Приведенные к атмосферному давлению время пиролиза и задержки воспламенения смесей с одинаковым содержанием карборана.

1 — пиролиз $0,01\text{C}_2\text{B}_4\text{H}_6 + \text{Ar}$; 2 — воспламенение $0,01\text{C}_2\text{B}_4\text{H}_6 + 0,065\text{O}_2 + \text{Ar}$; 2' — расчетные (4) значения задержек воспламенения.

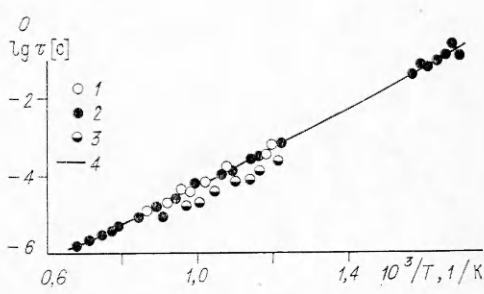


Рис. 6. Результаты пересчета по (6) задержек воспламенения карборановых смесей различного состава к задержке воспламенения смеси $0,031\text{C}_2\text{B}_4\text{H}_6 + 0,204\text{O}_2 + \text{Ar}$ при атмосферном давлении.

1 — $0,02\text{C}_2\text{B}_4\text{H}_6 + 0,065\text{O}_2 + \text{Ar}$; 2 — $0,01\text{C}_2\text{B}_4\text{H}_6 + 0,065\text{O}_2$; 3 — $0,01\text{C}_2\text{B}_4\text{H}_6 + 0,99\text{O}_2$; 4 — воспламенение смеси $0,031\text{C}_2\text{B}_4\text{H}_6 + 0,204\text{O}_2 + \text{Ar}$ при $p = 0,1$ МПа (эксперимент).

равной, согласно (2), энергии активации пиролиза ($E = E_{\text{п}}$). Подставляя W_q из (2) в (3), получаем

$$\frac{\tau}{\tau_{\text{п}}} = \frac{c'_v RT^2}{E_{\text{п}} Q c_{\text{к}}} - \frac{c_p RT^2}{E_{\text{п}} Q \xi_{\text{к}}} \quad (4)$$

(c_p — теплоемкость моля смеси; $\xi_{\text{к}}$ — мольная доля карборана в смеси).

Таким образом, вследствие предположения о высокотемпературном пиролизе карборана, как лимитирующей стадии окисления, получаем соотношение (4), связывающее τ с $\tau_{\text{п}}$. Для проверки (4) проведены опыты по измерению времени пиролиза и воспламенения смесей с одинаковым содержанием карборана: $0,01\text{C}_2\text{B}_4\text{H}_6 + \text{Ar}$ и $0,01\text{C}_2\text{B}_4\text{H}_6 + 0,065\text{O}_2 + \text{Ar}$. Методика определения τ описана выше. Что касается пиролиза карборана, то его отличает помимо выделения водорода образование твердой фазы [10, 11]. Возникновение в процессе пиролиза рассеивающей и поглощающей свет твердой фазы обусловило и выбор способа регистрации времени пиролиза как времени стабилизации эффективного поглощения за отраженными УВ светового пучка, проходящего перпендикулярно оси трубы. Характерный пример изменения интенсивности проходящего света I на длинах волн $\lambda = 215, 300$ и 400 нм приведен на рис. 4. Как и следовало ожидать, измеряемая величина $\tau_{\text{п}}$ (временной интервал между точками i и f) практически не зависит от λ , что подтверждают данные [10, 11] об образовании твердой фазы при пиролизе карборанов.

Обработка данных показала, что и задержки воспламенения, и время пиролиза карборана обратно пропорциональны давлению ($\tau, \tau_{\text{п}} \sim 1/p$). Поэтому результаты измерения временных характеристик представлены на рис. 5 в виде приведенных к атмосферному давлению. Как следует из рис. 5, расчетные и экспериментальные данные отличаются не более чем в 2 раза. Подобное согласование подтверждает предположение о пиролизе, как лимитирующей стадии воспламенения. Отметим, что следующая за пиролизом стадия быстрого окисления не связана с водородом — единственным (исключая следы метана) газообразным продуктом пиролиза [10, 11]. Это следует из того факта, что воспламенение стехиометрической смеси водород — воздух на порядок длительнее воспламенения стехиометрической смеси карборан — воздух (см. рис. 3), хотя содержание водорода в первой смеси больше, чем выделяется даже при полном дегидрировании карборана.

Высокая химическая активность продуктов пиролиза может быть связана лишь с твердой фазой, образующейся при пиролизе карборана. По данным проведенного в работе элементного анализа, состав твердой фазы для карборана-4 отвечает формуле $\text{C}_{2,07 \pm 0,1} \text{B}_4 \text{N}_{1,95 \pm 0,1}$. Анализ под-

вергались твердые продукты пиролиза $C_2V_4H_6$ при $T = 1380 \div 1400$ К и времени выдержки при указанной температуре $\tau_n \sim 0,5$ мс; подобные условия достигались за отраженными УВ в смеси $0,03C_2V_4H_6 + Ar$. С учетом ошибки анализа представляется корректным описывать состав твердых продуктов брутто-формулой $C_2V_4H_2$.

Помимо подтверждения предлагаемого в работе механизма воспламенения соотношение (4) позволяет предложить и способ расчета задержки воспламенения смесей различного состава по известной зависимости $\tau(T)$ для одной из смесей. Действительно, поскольку время пиролиза карборана обратно пропорционально его объемной концентрации $\tau_n \sim 1/c_K$, что следует из определенной в работе зависимости $\tau_n \sim 1/p$ смеси заданного состава, то из (4) получаем

$$\tau = A(T) c_p / Q \xi_{KR}^2 p, \quad (5)$$

где коэффициент $A(T)$ зависит лишь от температуры. Тогда при известном значении $\tau(T, p)$ одной из смесей, которая ниже обозначается индексом s , величина $\tau(T, p)$ другой смеси может быть определена из соотношения

$$\frac{\tau}{\tau_s} = \left(\frac{c_p}{\xi_{KR}^2 p} \right) \left/ \left(\frac{c_p}{\xi_{KR}^2 p} \right)_s \right. . \quad (6)$$

С целью проверки полученного соотношения проведен пересчет по (6) значений $\tau(T, p)$ различных смесей к соответствующему значению стехиометрической смеси карборан — воздух при атмосферном давлении. Как следует из рис. 6, результаты расчета удовлетворительно согласуются с экспериментом: значения τ для стехиометрической смеси $0,031C_2V_4H_6 + 0,204O_2 + Ar$ отличаются от опытных не более чем в 3 раза.

В заключение отметим, что из изложенного материала ясно, сколь важную роль играет в окислении карборана его пиролиз. Однако в задачу предлагаемой работы не входит детальный анализ этого процесса. Тем не менее полученные результаты позволяют уже сейчас указать некоторые его основные черты:

1) пиролиз не является радикально-цепным процессом. В противном случае добавление кислорода и его взаимодействие с вероятными радикалами пиролиза Н или ВН (СН) повлияло бы на кинетику расщепления карборана. В этом случае не выполнялось бы подтвержденное экспериментально соотношение (4), полученное в предположении совпадения скоростей исчезновения карборана при пиролизе и окислении;

2) пиролиз не связан и с распадом карборана, так как мономолекулярный распад не объясняет обнаруженную в экспериментах зависимость скорости пиролиза от давления, а бимолекулярный распад для таких многоатомных молекул, как $C_2V_4H_6$, маловероятен [13]. При этом наиболее вероятно направление пиролиза — безрадикальный синтез компонентов состава $(C_2V_4H_2)_n$, протекающий с $E_n = 117$ (28) кДж (ккал)/моль (см. рис. 5) и сопровождающийся выделением водорода.

Подводя итог, кратко сформулируем основные результаты работы.

1. Исследованы характеристики воспламенения карборана-4 в кислородсодержащих средах. Показано, что воздушные смеси карборана воспламеняются на порядок быстрее водородовоздушных смесей и на три порядка — углеводородовоздушных.

2. Предложен механизм воспламенения, в соответствии с которым лимитирующей стадией процесса является пиролиз карборана.

3. На основании исследованных характеристик пиролиза предложен метод расчета задержек воспламенения, удовлетворительно согласующийся с экспериментом.

Авторы благодарны Б. Е. Гельфанду и И. С. Заслонко за полезное обсуждение работы и ценные советы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гельфанд Б. Е., Калинин В. И., Петрушин А. Б. и др. Докл. АН СССР, 1978, 240, 2, 627.
2. Shapiro I., Keilin B., Williams R. E. et al. J. Amer. Chem. Soc., 1963, 85, 20, 3167.
3. Lipscomb W. N. Boron hydrides.— N. Y.: Amsterdam: W. A. Benjamin Inc., 1963.
4. Жигач А. Ф., Стасинович Д. С. Химия гидридов.— Л.: Химия, 1969.
5. Граймс Р. Карбораны.— М.: Мир, 1974.
6. Гейдон А., Герл И. Ударная труба в химической физике высоких температур.— М.: Мир, 1966.
7. Гальченко Г. Л., Тамм И. Б., Брыкина Е. И. и др. ЖФХ, 1985, 59, 11, 2689.
8. Борисов А. А. Докт. дис.— М.: ИХФ АН СССР, 1970.
9. Похил П. Ф., Беляев А. Ф., Фролов Ю. В. и др. Горение порошкообразных металлов в активных средах.— М.: Наука, 1972.
10. Захаркин Л. И., Калинин В. И., Балькова Т. И. и др. ЖОХ, 1973, 43, 10, 2258.
11. Astheimer R. J., Sneddon L. G. Inorg. chem., 1983, 22, 13, 1928.
12. Франк-Каменецкий Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике.— М.: Наука, 1967.
13. Forst W. Theory of unimolecular reactions.— N. Y.; London: Acad. press, 1973.

Поступила в редакцию 15/VI 1987

УДК 536.46

АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ РЕЖИМ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ

Ю. А. Бувечич, Н. А. Королева, С. П. Федотов

(Свердловск)

Теоретическому анализу горения спрессованных порошков металлов в газообразном окислителе, фильтрующемся в зону реакции, посвящено большое число работ (см., например, [1—5]). Наиболее полно в рамках квазигомогенной модели исследованы стационарные режимы горения, дана классификация различных по структуре тепловых волн химической реакции [1—3]. В [4] рассмотрена задача об устойчивости стационарных режимов и найдено, что может иметь место одномерная и морфологическая неустойчивость плоского фронта волны горения. Исследованию нестационарного развития волны горения, включающего этапы кинетического и диффузионного режимов, посвящена работа [5], в которой найдено автомодельное решение нестационарной системы уравнений горения в фильтрационном режиме, а также численно решена задача об автоколебательном режиме на кинетическом этапе.

Цель настоящей работы состоит в аналитическом определении амплитуды и частоты одномерных автоколебаний температуры и скорости движения плоского фронта фильтрационного горения при небольшом удалении от границы устойчивости. Исследование проведено методами теории бифуркации [6, 7], успешно использованной при анализе автоколебательных режимов горения безгазовых и диффузионных систем [8—10].

Постановка задачи

Занимем в континуальном приближении в системе координат, движущейся справа налево со скоростью движения волны горения $U(t)$, систему уравнений фильтрационного горения [1—5]

$$\begin{aligned}
 C \frac{\partial T}{\partial t} + CU(t) \frac{\partial T}{\partial x} + c_{\Gamma} \rho_{\Gamma} v \frac{\partial T}{\partial x} &= \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + Q_{\Gamma_0} w, \\
 \frac{\partial \rho_{\Gamma}}{\partial t} + U(t) \frac{\partial \rho_{\Gamma}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_{\Gamma} v) &= \mu_{\Gamma} \rho_0 w, \quad v = -k \frac{\partial p}{\partial x}, \\
 \frac{\partial \eta}{\partial t} + U(t) \frac{\partial \eta}{\partial x} &= w, \quad p = R \rho_{\Gamma} T / \sigma, \quad \rho_{\kappa} = \rho_0 (1 - \eta), \\
 \rho_{\Pi} &= \mu_{\Pi} \rho_0 \eta, \quad \mu_{\Pi} = 1 - \mu_{\Gamma}, \quad C = c_{\kappa} \rho_{\kappa} + c_{\Gamma} \rho_{\Gamma} + c_{\Pi} \rho_{\Pi}.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$