

18. Д. К. Кюл. Ракетная техника и космонавтика, 1965, 3, 12, 83.
 19. А. Ф. Беляев, Ю. В. Фролов, А. И. Коротков. ФГВ, 1968, 4, 3, 323.
 20. А. Мачек. Вопросы ракетной техники, 1968, 12, 22.
 21. П. Блэкмен, Д. К. Кюл. Ракетная техника, 1961, 31, 9, 104.

УДК 622.615

ОДНОЗНАЧНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ БАЛЛИСТИТНОГО ПОРОХА ОТ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ

А. А. Зенин, Б. В. Новожилов
 (Москва)

Температура поверхности горящего пороха T_n является важной характеристикой процессов, происходящих в реакционном слое (РС) конденсированной фазы (к-фазы). В общем случае T_n зависит от начальной температуры пороха T_0 и давления p . В свою очередь параметры T_0 и p определяют скорость горения пороха u . Имеющиеся в настоящее время экспериментальные данные для баллиститного пороха Н [1—4] позволяют показать, что для него может существовать однозначная, т. е. не зависящая от других параметров (например, от давления), связь $T_n = F(u)$.

Известно, что две функции $u = f(p, T_0)$ и $T_n = \Psi(p, T_0)$ называются зависимыми одна от другой, если для каждой точки (p, T_0) имеет место тождество $\Psi(p, T_0) \equiv F[f(p, T_0)]$, т. е. одна из функций может быть представлена через другую — $T_n = F(u)$. Аналитический признак зависимости f и Ψ состоит в том, что якобиан

$$I = \frac{D(f, \Psi)}{D(p, T_0)}$$

должен обращаться тождественно в нуль. Полученные в работах [1—4] экспериментальные данные позволяют построить функции f и Ψ и найти значения производных, получаемых после раскрытия якобианов, для режимов $p = 1$ атм, $T_0 = 20^\circ \text{C}$ и $p = 20$ атм, $T_0 = 20^\circ \text{C}$.

Очевидно, если значения I будут отличаться от нуля меньше, чем на ошибку вычисления ΔI , то вполне возможно, что якобиан I равен нулю. Для $p = 1$ атм, $T_0 = 20^\circ \text{C}$ получаем: $I = \left(\frac{\partial u}{\partial p}\right)_{T_0} \left(\frac{\partial T_n}{\partial T_0}\right)_p - \left(\frac{\partial u}{\partial T_0}\right)_p \times \left(\frac{\partial T_n}{\partial p}\right)_{T_0} = (0,03 \cdot 0,4 - 0,8 \cdot 10^{-3} \cdot 13) = 1,6 \cdot 10^{-3}$ см/с·атм, причем вероятная ошибка вычисления ΔI составляет $\pm 3,5 \cdot 10^{-3}$ см/с·атм. Аналогично для $p = 20$ атм, $T_0 = 20^\circ \text{C}$ получим: $I = (0,014 \cdot 0,6 - 1,85 \cdot 10^{-3} \cdot 3,6) = 1,7 \cdot 10^{-3}$ см/с·атм, вероятная же ошибка вычисления составляет в этом случае $\pm 2,5 \cdot 10^{-3}$ см/с·атм.

Таким образом, с точностью до ошибки экспериментов якобианы указанных режимов равны нулю и для пороха Н может существовать однозначная зависимость $T_n = F(u)$. В существовании этой зависимости можно убедиться и непосредственно, если нанести все данные по температуре поверхности пороха Н на график $T_n = F(u)$. На рис. 1 приведены средние значения T_n для трех режимов горения.

Температура поверхности баллиститного пороха Н определяется лишь скоростью горения, независимо от того, каким способом эта ско-

рость достигнута — начальной температурой или давлением. Из полученного результата можно сделать следующие выводы:

1. Существование однозначной функции $T_n = F(u)$ позволяет существенно упростить теоретический анализ нестационарных режимов горения, поскольку T_n оказывается зависящей только от одной переменной. Авторы ряда теоретических работ (см. [5]) произвольно (для простоты анализа) предполагали существование однозначной связи $T_n = F(u)$. Полученный нами результат можно рассматривать как обоснование этого предположения.

2. Объединение всех экспериментальных данных в зависимость $T_n = F(u)$ позволяет с большой точностью найти кинетические константы реакции в РС к-фазы пороха Н. Прежде всего, равенство нулю якобианов (или эквивалентная этому однозначная) зависимость $T_n = F(u)$ указывает на то, что порядок реакции по давлению в РС к-фазы равен нулю. Таким образом, основными реакциями являются жидкофазные. В настоящее время неизвестен порядок реакции в РС к-фазы по реагентам, однако полученные данные показывают, что независимо от этого порядка (нулевой или первый) энергия активации в РС к-фазы равна 19 ± 1 ккал/моль, а предэкспонент $k_{0,1} = \left(4 \begin{smallmatrix} +6 \\ -2 \end{smallmatrix}\right) \cdot 10^9$ (г/см³, л/с). Для реакции нулевого порядка по реагентам использовалась формула Мержанова — Дубовицкого [6], а для реакции первого порядка — Новикова — Рязанцева [7].

На рис. 2 в качестве примера показано получение кинетических констант для реакции нулевого порядка по реагентам. Экспериментальные данные представлены на этом рисунке в координатах

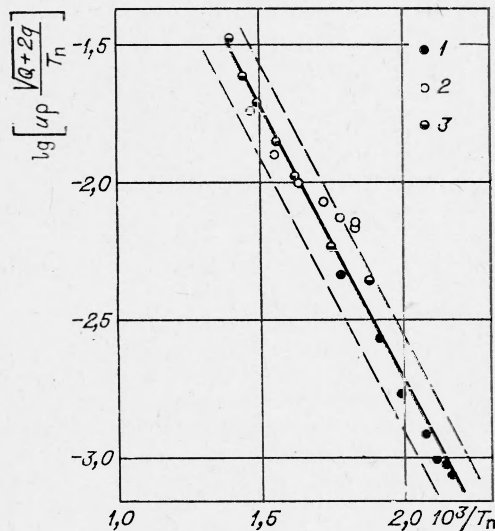


Рис. 2. К нахождению эффективных кинетических констант E и k_0 в РС к-фазы для реакции нулевого порядка по реагентам.

1 — $p=1$ атм, $T_0 = -196 \pm 140^\circ \text{C}$; 2 — $p=20$ атм, $T_0 = -130 \pm 150^\circ \text{C}$; 3 — $p=5 \pm 100$ атм, $T_0 = 20^\circ \text{C}$.

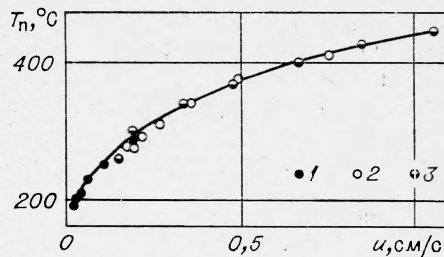


Рис. 1. Зависимость температуры поверхности от скорости горения для баллистического пороха Н.

1 — $p=1$ атм, $T_0 = 196 \pm 140^\circ \text{C}$; 2 — $p=20$ атм, $T_0 = -150 \pm 150^\circ \text{C}$; 3 — $p=100$ атм, $T_0 = 20^\circ \text{C}$.

$$\lg \left(u \rho \frac{\sqrt{Q+2q}}{T_n} \right), \frac{1}{T_n},$$

где T_n — температура горячей поверхности пороха, $^\circ \text{K}$; ρ — плотность пороха; Q — тепловыделение в РС к-фазы, кал/г; q — теплоподвод теплопроводностью из газа в к-фазу, кал/г. Для расчета величин E и k использовался метод наименьших квадратов. Пунктиром показан доверительный интервал. Высокая точность определения кинетических констант является следствием большого интервала скоростей, в котором производились измерения T_n , Q и q .

3. Однозначная зависимость позволяет со значительно более высокой точностью, чем это делалось ранее (см. [3]), получить

значения производных $(\partial T_n / \partial T_0)_p$, необходимых для вычисления критерия устойчивости, учитывающего переменность температуры поверхности.

В предположении постоянства температуры поверхности Я. Б. Зельдовичем [8] было получено условие устойчивости горения

$$Z < 1; \quad Z = \beta (T_n - T_0), \quad \beta = \left(\frac{\partial \ln u}{\partial T_0} \right)_p.$$

Учет переменности T_n дает критерий устойчивости [9] при $Z > 1$

$$N < 1; \quad N = \frac{(Z-1)^2}{(Z+1)r}, \quad r = \left(\frac{\partial T_n}{\partial T_0} \right)_p.$$

Критерии Z и N имеют наиболее общий характер, так как не связаны с моделями стационарного процесса горения.

$T_0, ^\circ\text{C}$	r	Z	N
-----------------------	-----	-----	-----

Давление 1 атм

0	0,35	2,45	1,74
50	0,50	2,50	1,28
100	0,90	2,70	0,87

Давление 20 атм

-150	0,20	0,20	0,20
-100	0,16	0,75	0,75
-50	0,20	1,20	0,09
0	0,30	1,55	0,40
50	0,40	2,00	0,84
100	0,60	2,34	0,89
140	0,90	2,70	0,87

С помощью данных, представленных на рис. 2, нетрудно получить уточненную зависимость $T_n(T_0)$ для опытов с переменной T_0 и найти значения r , Z и N . Эти величины для пороха Н при давлениях 1 и 20 атм в зависимости от T_0 представлены в таблице. Точность получения r (имеется в виду вероятная ошибка) $\pm 10 \div \pm 12\%$, точность вычисления $Z - \pm 5 \div \pm 8\%$, $N - \pm 15 \div \pm 20\%$.

Напомним (см. [4]), что при 20 атм горение пороха устойчиво во всем диапазоне T_0 ; при 1 атм и $T_0 < +60^\circ\text{C}$ горение становится пульсирующим. Переход к пульсационному горению позволяет проверить работу критериев: вблизи $T_0 = +60^\circ\text{C}$ они должны перестать выполняться. Из приве-

денных в таблице данных видно, что N значительно лучше предсказывает поведение пороха, чем критерий Z . При 20 атм N всюду меньше единицы, т. е. предсказывает устойчивые режимы горения, что и имеет место в действительности; при 1 атм в интервале $T_0 = +50 \div 100^\circ\text{C}$ он превышает единицу, т. е. предсказывает срыв устойчивости горения, что соответствует действительности. Таким образом, видно, что учет переменности T_n с изменением T_0 является необходимым для современной теории устойчивости горения. Лучшее выполнение критерия N по сравнению с критерием Z отмечалось в [3]. Однако низкая точность вычисления N позволяла ранее говорить лишь о тенденции улучшения предсказания срыва устойчивости при учете переменности T_n .

Заметим, что распределения температуры по зонам горения пороха Н, представленные в работах [1, 2, 4], позволяют показать справедливость исходных положений теорий нестационарной скорости горения [8, 9—11]: малой инерционности РС, конденсированной и газовой фазы по сравнению с инерционностью теплового слоя к-фазы. Можно показать, что по верхней оценке толщина РС к-фазы составляет для различных режимов $5 \div 20\%$ толщины теплового слоя к-фазы, т. е. действительно РС к-фазы можно считать малоинерционным. Можно также показать, что время тепловой релаксации газовой фазы (имеется в виду область переменных температур дымогазовой зоны) меньше времени релаксации теплового слоя к-фазы: при 1 атм — в 330 раз, при 20 атм — в 90 раз, при 50 атм — в 30 раз и при 100 атм — в 12 раз. Таким образом, и газовая фаза может считаться малоинерционной.

Наконец, однозначная зависимость $T_n = F(u)$ позволяет получить определенные сведения о процессах в РС к-фазы двусоснового пороха. Из таблицы видно, что r всегда больше нуля. Это говорит о том, что

поверхность горящего двуосновного пороха скорее всего не является слоем кипящих легколетучих компонентов пороха Н (нитроглицерина и динитротолуола), так как при фиксированном давлении температура кипения — величина постоянная.

В литературе имеются различные точки зрения на процессы в РС к-фазы баллиститного пороха [12—14]. Авторы работы [12] считают, что поверхность горящего нитроглицеринового пороха есть поверхность кипения летучих компонент. Этот вывод сделан на том основании, что T_n остается практически неизменной (в пределах ошибок измерений) при фиксированном давлении и изменении T_0 от -60 до $+120^\circ\text{C}$. В работе [4] было показано, что примерно двукратное расширение интервала T_0 позволяет обнаружить изменение T_n при фиксированном давлении. Авторы работ [13, 14] с помощью прямых измерений (метод импульсной калориметрии) показали, что, по крайней мере, в вакууме РС к-фазы горящего двуосновного пороха Н состоит из никроклетчатки, через которую диффундируют, частично разлагаясь, пары летучих.

В заключение укажем, что однозначная зависимость $T_n = F(u)$ — характерная особенность баллиститного пороха. Для перхлората аммония такой зависимости не существует (см. [15]): функция $T_n = F(u)$ различна при разных давлениях.

Поступила в редакцию
27/XI 1972

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Зенин. ФГВ, 1966, 3, 2, 67.
2. А. А. Зенин. Канд. дисс. М., ИХФ, 1962.
3. А. А. Зенин, О. И. Нефедова и др. Докл. АН СССР, 1966, 169, 3 619.
4. А. А. Зенин, О. И. Нефедова. ФГВ, 1967, 3, 1, 45.
5. Ф. Е. Кулик. РТИК, 1968, 6, 12.
6. А. Г. Мержанов, Ф. И. Дубовицкий. Докл. АН СССР, 1959, 199, 3, 635.
7. С. С. Новиков, Ю. С. Рязанцев. ПМТФ, 1965, 3, 43.
8. Я. Б. Зельдович. ПМТФ, 1964, 3, 126.
9. Б. В. Новожилов. ПМТФ, 1965, 4, 157.
10. Б. В. Новожилов. Докт. дисс. М., ИХФ, 1967.
11. Б. В. Новожилов. ФГВ, 1968, 4, 4, 428.
12. А. А. Ковальский, Э. В. Конев, Б. В. Красильников. ФГВ, 1967, 3, 4, 547.
13. В. В. Александров. Канд. дисс. Новосибирск, ИХКиГ, 1970.
14. В. В. Александров, С. С. Хлевной. ФГВ, 1970, 6, 4, 438.
15. А. П. Глазкова, А. А. Зенин, А. А. Балепин. II Междунар. симпозиум по процессам горения. Сб. докл., т. I, № 3—4, Варшава, 1970, стр. 261.

УДК 662.58

О ТЕПЛОМ ПРЕДЕЛЕ ГЕТЕРОГЕННОГО ВОСПЛАМЕНЕНИЯ

А. М. Гришин, Н. А. Игнатенко,
(Томск)

Гетерогенному воспламенению реагирующих веществ посвящены работы [1—7].

В данной работе исследуются условия гетерогенного воспламенения слоя горючего в полубесконечном пространстве, заполненном окислителем. Показано, что вследствие оттока тепла через холодную стенку име-