

ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ НИТРАМИНОВ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

УДК 536.46

В. Н. Симоненко, А. Б. Кискин, В. Е. Зарко, А. Г. Свит

Институт химической кинетики и горения СО РАН, 630090 Новосибирск

Представлены результаты исследования горения гексогена и октогена с помощью датчика реактивной силы. Изучены режимы самоподдерживающегося горения и горения под действием внешнего излучения. Обнаружен высокочастотный (свыше 600 Гц) компонент в сигнале реактивной силы при горении гексогена. Установлено, что при атмосферном давлении самоподдерживающееся горение октогена имеет автоколебательный характер. Изучены особенности резонансного отклика при горении октогена под действием модулированного излучения лазера.

Проверка и обоснование моделей горения конденсированных веществ часто проводятся путем сравнения их с экспериментальными данными по зависимости стационарной скорости горения от начальной температуры и давления. Уже отмечалось ранее [1], что этот прием не обеспечивает достоверности проверки теории просто из-за большой «гибкости» теоретических описаний, обусловленной наличием большого числа согласующих параметров. В связи с этим важное значение приобретают результаты экспериментов по нестационарному горению, которые предоставляют уникальные возможности для адекватного сравнения теории с экспериментом, так как соответствуют значительному разнообразию условий горения.

Одним из типов нестационарного горения является режим самоподдерживающегося горения вблизи предела устойчивости стационарного горения. Из теории известно, что вблизи предела устойчивости малые возмущения приводят к возникновению незатухающих колебаний скорости горения, приобретающих по мере удаления от предела нелинейный характер [2]. Следует отметить, что наблюдаемые иногда пульсации температуры или концентраций компонентов в газовой фазе (при измерениях в точке микротермопарами или микрозондами) не могут быть отождествлены с предсказываемыми теорией периодическими послонными колебаниями скорости горения и обусловлены, как правило, микронеоднородностями состава конденсированных веществ или образованием газовых пузырей в поверхностном слое. Реально можно назвать лишь один достоверный факт (см. работу [3]) обнаружения послонных колебаний скорости горения катализированного двухосновного топлива в самоподдерживающемся режиме горения. При этом измерялась реактивная сила продуктов сгорания, величина которой пропорциональна перепаду давления в зоне пламени, усредненному по сечению образца. Величина амплитуды колебаний сигнала и характер его поведения во времени полностью соответствовали ожидаемому в случае одномерного режима горения.

В настоящем сообщении представлены результаты исследования горения гексогена и октогена при атмосферном давлении в самоподдерживающемся режиме, а также при на-

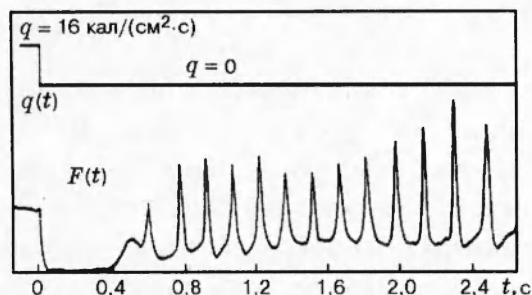


Рис. 1

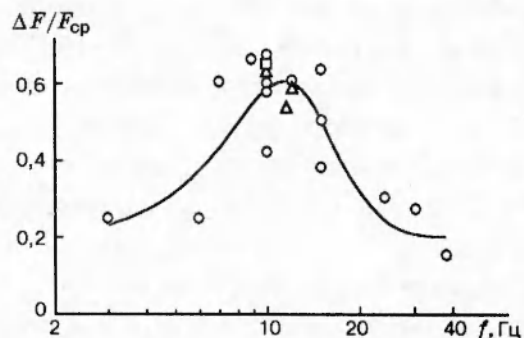


Рис. 2

Рис. 1. Осциллограмма сигнала реактивной силы при горении октогена ($T_0 = 20^\circ\text{C}$)

Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики отклика реактивной силы октогена: глубина модуляции излучения: \circ — 33%; Δ — 20%; \square — 5%

личии периодических осцилляций внешнего потока излучения. В экспериментах использовались прессованные при давлении $6,5 \div 7 \text{ т/см}^2$ цилиндрические образцы длиной 8 мм и диаметром 8, 10 и 16 мм. Для бронировки образцы покрывались по боковой поверхности линолеумом либо плотно вставлялись в кварцевые трубки. Для зажигания и воздействия на процесс горения использовался неодимовый лазер (длина волны излучения 1,06 мкм). Опыты проводились на образцах нитраминол с добавкой 0,5% ламповой сажи для уменьшения прозрачности и отражательной способности исследуемых веществ. Контрольные эксперименты с образцами без сажи показали, что добавка 0,5% сажи не оказывает влияния (в пределах разброса данных) на скорость и характер самоподдерживающегося горения. В экспериментах регистрировались сигналы реактивной силы и свечения пламени. Методика исследований подробно описана в работах [4, 5].

Характерная особенность регистрируемого сигнала при горении гексогена — наличие высокочастотной составляющей с частотой колебаний $570 \div 600 \text{ Гц}$, соответствующей собственной частоте механического узла датчика силы. Такое поведение обусловлено тем, что измеряемая реактивная сила содержит колебания, частота которых превышает собственную частоту механического узла. Можно предполагать, что источником этих колебаний является процесс разрыва пузырей, образующихся в расплавленном поверхностном слое гексогена. Запись сигнала с фильтром верхних частот имеет ровный характер. После отключения источника внешнего излучения переход на новый стационарный режим происходит без задержки и «провала» в уровне реактивной силы. При воздействии гармонически модулированного излучения лазера регистрируется резонансный отклик сигнала реактивной силы в области частот $5 \div 6 \text{ Гц}$.

Горение октогена в самоподдерживающемся режиме имеет автоколебательный характер (рис. 1). При относительно низких начальных температурах ($-20, 20^\circ\text{C}$) интервалы длительностью $1 \div 3 \text{ с}$ регулярных колебаний ($4,5 \div 6 \text{ Гц}$) реактивной силы со значением в минимуме, близким к нулевому, перемежаются участками колебаний с уменьшающейся амплитудой. При этом с понижением амплитуды частота колебаний увеличивается. Амплитуда колебаний определялась как $\Delta F = (F_{\max} - F_{\min})/2$. Здесь F_{\max} , F_{\min} соответствуют максимальному и минимальному значениям реактивной силы за период колебания.

С повышением начальной температуры увеличиваются абсолютная амплитуда колебаний реактивной силы и их частота ($8 \div 10$ Гц при 140°C). Относительная амплитуда колебаний ($\Delta F/F_{\text{ср}}$) уменьшается, и колебания становятся более регулярными.

Отметим, что попытка описать горение октогена с позиции квазистационарности газовой фазы по отношению к процессам в конденсированной фазе наталкивается на противоречие. Согласно феноменологической теории [6] автоколебания скорости горения должны происходить вблизи границы устойчивости стационарных режимов. При этом $f \sim \sqrt{k}$, где f — частота колебаний, $k = \beta(T_s - T_0)$, T_s — температура поверхности, T_0 — начальная температура, причем $k > 1$. При $k < 1$ ожидается, что колебания отсутствуют полностью. Здесь параметр $\beta = d \ln(u)/dT_0$ характеризует чувствительность стационарной скорости горения к вариациям начальной температуры. Оценки показывают, что если использовать эффективное значение β , определенное в опытах с колебательным горением октогена при атмосферном давлении, величина k оказывается меньше 1. Действительно, при $T_0 = 100^\circ\text{C}$ и экспериментальном значении $\beta = 2 \cdot 10^3 \text{ K}^{-1}$, положив оценочно $T_s = 400^\circ\text{C}$, получим $k = 0,6$. Автоколебательный характер горения при таком значении параметра k находится в противоречии с предсказаниями линейной теории [6]. Причина этого, возможно, заключается в том, что используемые для оценки параметры стационарной волны горения октогена при атмосферном давлении фактически являются усредненными, но никак не «стационарными», поскольку усреднение проводится для автоколебательного типа горения, являющегося сугубо нелинейным режимом.

При действии гармонически модулированного излучения отклик реактивной силы для октогена имеет ярко выраженный резонансный характер. Эксперименты проводились при $T_0 = 20^\circ\text{C}$, средняя плотность излучения $q_{\text{ср}} = 14 \text{ кал}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$. Значение резонансной частоты $10 \div 12$ Гц (рис. 2). Амплитуда отклика составляет $60 \div 70\%$ при глубине модуляции интенсивности излучения 30% . Характер отклика сигнала реактивной силы сугубо нелинеен, что проявляется как в форме сигнала отклика, так и в зависимости величины амплитуды отклика от глубины модуляции. При уменьшении глубины модуляции до уровня 10 и даже 5% амплитуда отклика в области резонансной частоты остается постоянной. С удалением от резонансной частоты происходит потеря регулярности отклика, а затем (при значительном удалении) горение октогена переходит в режим колебаний на частоте резонанса. Следует заметить, что при постоянной мощности излучения в большинстве экспериментов горение октогена носило стационарный характер, однако в ряде случаев наблюдались колебательные режимы горения с частотой осцилляций реактивной силы $10 \div 13$ Гц. Нестационарность горения октогена также отмечалась в работе [7].

Таким образом, в данной работе установлено, что горение октогена при нормальных условиях происходит в автоколебательном режиме. Известны лишь единичные примеры газифицирующихся конденсированных веществ, при горении которых удается наблюдать ярко выраженные автоколебания скорости горения. С учетом относительной простоты химического строения данного соединения и достаточно большого объема накопленной информации о его реагировании в газовой фазе представляется целесообразным провести экспериментальные исследования характеристик горения в более широком диапазоне изменений внешних условий и использовать эти данные для сравнения с результатами математического моделирования с целью лучшего понимания механизма нестационарного горения. В заключение отметим, что в дальнейших исследованиях необходимо детально изучить природу высокочастотного процесса, сопровождающего процесс горения гексогена.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гусаченко Л. К., Зарко В. Е., Зырянов В. Я., Бобрышев В. П. Моделирование процессов горения твердых топлив. Новосибирск: Наука, 1985.
2. Зарко В. Е., Симоненко В. Н., Кискин А. Б. Нестационарное горение конденсированных веществ под воздействием излучения // Физика горения и взрыва. 1987. Т. 23, № 3. С. 16–26.
3. Симоненко В. Н., Зарко В. Е., Кискин А. В. Исследование нестационарных режимов горения баллистических порохов. Новосибирск, 1980. (Препр. / АН СССР. Сиб. отд-ние. ИХКиГ; № 10).
4. Симоненко В. Н., Зарко В. Е. Реактивная сила продуктов сгорания как мера нестационарной скорости горения пороха // Физика горения и взрыва. 1981. Т. 17, № 3. С. 129–132.
5. Zarko V. E., Simonenko V. N., Kiskin A. B. Unsteady burning of double base propellants // Progress in Astronautics and Aeronautics. V. 88. / J. R. Bowen, N. Manson, A. K. Oppenheim, R. I. Soloukhin (Eds). New-York: AIAA, Inc., 1983. P. 208–219.
6. Новожилов Б. В. Нестационарное горение твердых ракетных топлив. М.: Наука, 1973.
7. Parr T. P., Hanson-Parr D. M. Solid propellant flame structure // Materials Research Society, Symposium Proceedings. V. 418. / T. B. Brill, T. P. Russel, W. C. Tao, R. B. Wardle (Eds). Pittsburgh: MRS, 1996. P. 207–219.

Поступила в редакцию 5/VII 1997 г.
