

ЛИТЕРАТУРА

1. Современная техника аэродинамических исследований при гиперзвуковых скоростях/Под ред. А. М. Крилла.— М.: Машгиз, 1965.
2. Калугин В. М. ПМТФ, 1966, 4, 106.
3. Schumacher B. W., Gadamer E. O. Canad J. Phys., 1958, 36, 6, 659.
4. Заклязьминский Л. А., Рожков Р. С., Сафронов Л. А. ФГВ, 1979, 15, 4, 140.
5. Заслонко И. С., Смирнов В. И. ФГВ, 1980, 16, 1, 143.
6. Неравновесные физико-химические процессы в аэродинамике/Под ред. Г. И. Майкапара.— М.: Машиностроение, 1972.

Поступила в редакцию 26/VIII 1986,
после доработки — 26/III 1987

О НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЭФФЕКТАХ ПРИ ДОГОРАНИИ СИММЕТРИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В. А. Архипов, В. Н. Вилмонов, Вл. Ф. Трофимов

(Томск)

Изучение эффектов, связанных с догоранием образцов,— один из способов исследования нестационарного горения конденсированных веществ (к-веществ). Источником возмущения стационарного режима горения при этом служит деформация михельсоновского профиля температуры внутри образца по мере его догорания [1]. Гашение образцов на теплоотводящей металлической подложке (метод замораживания зоны горения) [2, 3], двустороннее догорание плоских пластин [4—8], цилиндрических и сферических элементов [8] позволяют получить информацию о закономерностях нестационарного горения в условиях, исключающих влияние посторонних факторов, не связанных непосредственно с механизмом горения (газодинамическое поле течения, внешние физико-химические воздействия, разрушение образцов, неоднородность задачи и т. п.). Вопрос о догорании симметричных элементов представляет также и практический интерес при прогнозировании характеристик переходных процессов в регулируемых газогенераторах с многослойным зарядом к-вещества [9]. В частности, в [6] показано, что при определенных условиях скачок давления при догорании пластины в полузамкнутом объеме может более чем в 2 раза превышать уровень стационарного давления.

Известные результаты по нестационарному догоранию симметричных элементов получены, как правило, в рамках допущений теории Я. Б. Зельдовича [4] методом интегральных соотношений или численным счетом задачи. В [8] экспериментально обнаружены некоторые эффекты, связанные с нестационарностью горения симметричных элементов (пластин и образцов с заполненным вязкой жидкостью цилиндрическим каналом). В настоящем сообщении проанализированы результаты экспериментального исследования нестационарного догорания плоскопараллельных пластин к-вещества в полузамкнутом объеме при двустороннем горении и догорании на подложках с разными теплофизическими свойствами.

Эксперименты проводили на установке (рис. 1), состоящей из камеры сгорания 1 объемом 10^{-4} м³ с двумя симметрично расположенными выходными отверстиями 2 диаметром 1,5—2,3 мм, отделенными от иссле-

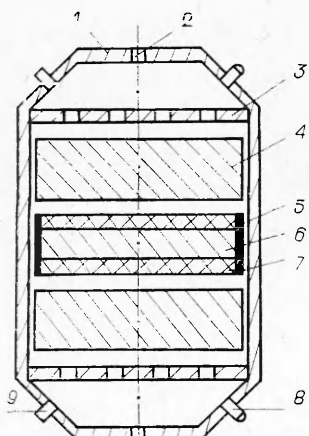


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

дуемого образца диафрагмами 3. Величина свободного объема камеры V варьировалась с помощью вкладышей 4 из инертного материала (текстолит). Образцы поджигали воспламенителями 8 электрокапсюльного типа. В экспериментах регистрировали динамику изменения давления в камере $p(t)$ в процессе догорания образцов тензометрическими датчиками 9 типа ЛХ-412 в комплекте с тензостанцией ЛХ-7000, согласованной со светолучевым осциллографом Н-117. Симметричность схемы установки позволяла исключить влияние газодинамических факторов при анализе результатов исследования.

Исследовали двустороннее горение плоскопараллельных образцов (к-вещество типа Н с флегматизатором) диаметром $d = 50$ мм, забронированных по боковой поверхности раствором линолеума в ацетоне. Начальная толщина образца $h_0 = 4 \div 8$ мм выбиралась из условия $h_0 \gg h_*$, где h_* — характерная толщина прогретого слоя. Стационарный режим горения в начальный период времени, а также адиабатические граничные условия и разогрев пластины в плоскости ее симметрии обеспечивались симметричностью условий горения и истечения.

Для этих же условий исследовали горение симметричных элементов, состоящих из двух пластин 7 к-вещества, прижатых к торцевым поверхностям подложки 6 из инертного материала. В обжатом состоянии элементы скрепляли по боковой поверхности слоем бронировки 5. Диаметр элементов 50 мм, толщина пластин и подложки 4 мм. В качестве материала подложки использовали красную медь (коэффициент температуропроводности $\kappa_n = 10^{-4}$ м²/с) и древесину ($\kappa_n = 10^{-7}$ м²/с).

При догорании пластин на медной подложке ($\kappa_n \gg \kappa$) происходит «замораживание» зоны горения, т. е. на пластинах реализуются изотермические граничные условия (коэффициент температуропроводности к-вещества $\kappa = 10^{-7}$ м²/с). Режим квазистационарного догорания образцов осуществляли на подложке из древесины ($\kappa_n \approx \kappa$). В этом случае фронт горения «не чувствует» приближения границы раздела и михельсоновский профиль температуры не деформируется. Все эксперименты проводили при одинаковой начальной температуре $T_n = 293$ К.

Результаты исследования показали, что после воспламенения в камере устанавливается стационарный режим с давлением p_0 , величину которого варьировали от 1 до 4 МПа. Начиная с некоторого момента времени, давление возрастает, достигая p_{\max} в конце процесса, после чего продукты сгорания свободно истекают. Причем амплитуда скачка давления $\Delta p = p_{\max} - p_0$ зависит от времени релаксации свободного объема камеры t_k : $\Delta p \approx 0,3p_0$ при $t_k = 10^{-2}$ с и $\Delta p \sim 0$ при $t_k = 10^{-1}$ с.

На рис. 2, 1 приведена экспериментальная зависимость $\pi_{\max} = p_{\max}/p_0$ от параметра $\gamma^{-1} = t_k/t_*$ (t_* — время сгорания прогремого слоя), а на рис. 2, 2 значения π_{\max} , рассчитанные по приближенной формуле, полученной в [6] для дробно-линейной аппроксимации зависимости стационарной скорости горения u от начальной температуры T_n методом интегральных соотношений:

$$\Delta p = A(T_s - T_n) \left(\frac{\beta T_n}{1 - \beta T_n} + \frac{c}{c_p} \right),$$

где $A = \chi k R \frac{\rho S}{uV} = \gamma \frac{k p_0}{T_n}$; χ — коэффициент тепловых потерь; k , R , c_p — показатель адиабаты, газовая постоянная, удельная теплоемкость продуктов сгорания; ρ , c — плотность и удельная теплоемкость к-вещества; S — поверхность горения; T_n , T_s — температуры горения и поверхности горения; β — константа в законе скорости горения. Величину χ определяли полуэмпирическим методом при стационарном горении конденсированного вещества с использованием формулы Бори. Отметим, что точки на кривой 2 получены расчетом по приведенной выше формуле для конкретных экспериментов. Приближенная формула удовлетворительно описывает опытные данные при $\gamma^{-1} = 3 \div 9$ (погрешность не превышает 5 %); при $\gamma^{-1} < 1,5$ погрешность формулы возрастает до 70 %.

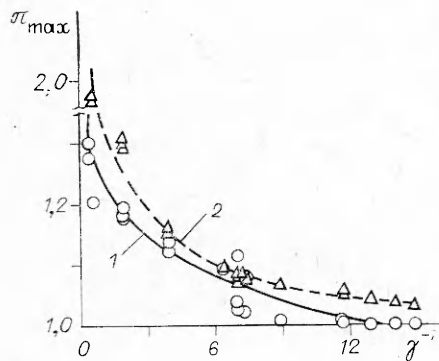


Рис. 2. Зависимость амплитуды скачка давления от соотношения характерных времен процесса.

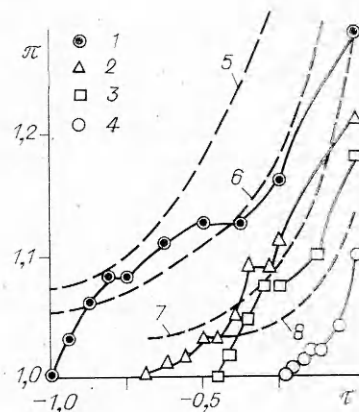


Рис. 3. Динамика изменения давления при двустороннем догорании пластины.

1—4 — эксперимент; 5—8 — теория. γ^{-1} :
1 — 0,28, 2 — 0,63, 3 — 2,0, 4 — 6,25, 5 — 1, 6 — 2, 7 — 3, 8 — 10.

Динамика изменения давления в камере в процессе двустороннего догорания пластины представлена на рис. 3 в зависимости от безразмерного времени $\tau = t/t_*$. Начало взаимодействия температурных профилей в плоскости симметрии пластины сопровождается увеличением давления в камере. Длительность нестационарного процесса τ_n и амплитуда скачка давления π_{\max} — 1 возрастают с параметром γ (сплошные кривые). Здесь же приведены результаты численного решения системы уравнений [6], описывающей догорание пластины в полузакнутом объеме. Численные результаты качественно согласуются с экспериментальными, однако расчетные значения существенно превосходят опытные как по длительности нестационарного процесса, так и по амплитуде скачка давления. Кроме того, в экспериментах обнаружено немонотонное нарастание давления в камере. Для $\gamma > 1$ на кривой давления отмечено два стационарных участка — плато, при $\gamma < 1$ — один. Длительность первого плато составляет $\sim 0,05\tau_n$, длительность второго уменьшается вместе с γ ($0,12\tau_n$ при $\gamma = 3,6$ и $0,1\tau_n$ при $\gamma = 1,6$). При $\gamma < 1$ первое плато вырождается, а длительность второго составляет $(0,10-0,12)\tau_n$. Эти данные свидетельствуют об аномальной зависимости скорости горения и газоприхода от T_n в области температур, близких к температуре вспышки к-вещества. Наиболее ярко эффект проявляется при $\gamma > 1$.

Аномалии зависимости скорости горения от давления (плато и даже падающие участки) обнаружены ранее в [10]. Известно также, что в интервале $T_n = 413 \div 423$ К экспериментальные данные для зависимости $u(T_n)$ хорошо аппроксимируются кусочно-линейной функцией с изломом [10]. Это косвенно подтверждает существование особенности для зависимости $u(T_n)$ к-вещества и возможность появления плато на графиках (см. рис. 3). При догорании тонкой пластины градиент температуры у поверхности может изменяться неравномерно (например, из-за плавления и кипения ингредиентов), что также может привести к немонотонному изменению скорости горения и газоприхода по аналогии с зависимостью $u(p)$ в переходном процессе в модели нестационарного горения с переменной T_s [4].

Результаты экспериментов по догоранию образцов на подложке показали, что при $x_n \approx x$ симметричные элементы выгорали полностью. На осциллограммах $p(t)$ в процессе догорания давление не изменилось. При $x_n \gg x$ после погасания оставался несгоревший слой к-вещества толщиной до 100 мкм. Причем процесс погасания на теплопроводящей подложке сопровождался уменьшением давления в камере, что согласуется с данными [2, 3].

Анализ результатов исследования показывает, что качественно теория [6] верно описывает процесс. Однако теоретически предсказанные величины амплитуды скачка давления превосходят зарегистрированные в экспериментах. Одним из объяснений этого расхождения может служить неоднородность фронта волны горения. В специально проведенных опытах по гашению образцов сбросом давления показано, что поверхность погашенной пластины шероховата, причем величина углублений достигает 0,5 мм. Поэтому при двустороннем догорании тонкой пластины взаимодействие температурных профилей в плоскости ее симметрии начинается в отдельных очагах с толщиной $\sim 2h_*$, что не учитывалось при выводе теоретической зависимости для Δp .

Сопоставление результатов по двустороннему догоранию пластины и горению ее на подложках показывает, что в силу идентичности условий проведения экспериментов механизм появления скачка давления связан с увеличением скорости горения, вызванным разогревом ее центральной части. При горении на подложке с $\kappa_n \simeq \kappa$ температурный профиль не искажался, и пластины полностью догорали с постоянной скоростью, не «чувствуя» границы. Результаты экспериментов с горением на теплоотводящей поверхности полностью совпадают с данными [2, 3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Новожилов Б. В. Нестационарное горение твердых ракетных топлив.— М.: Наука, 1973.
2. Новиков С. С., Похил П. Ф., Рязанцев Ю. С. и др. Докл. АН СССР, 1968, 6.
3. Новиков С. С., Рязанцев Ю. С. ПМТФ, 1969, 2, 93.
4. Зельдович Я. Б., Лейпунский О. П., Либрович В. Б. Теория нестационарного горения пороха.— М.: Наука, 1975.
5. Гостинцев Ю. А., Марголин А. Д. ПМТФ, 1964, 5, 167.
6. Архипов В. А., Белоусов П. В., Виллюнов В. П. ФГВ, 1985, 21, 1, 31.
7. Гостинцев Ю. А. ПМТФ, 1973, 1, 162.
8. Архипов В. А., Виллюнов В. П., Трофимов В. Ф. и др.— В кн.: Химическая физика процессов горения и взрыва. Горение конденсированных систем.— Черноголовка, 1986.
9. Патент США № 3136122.
10. Новиков С. С., Похил П. Ф., Рязанцев Ю. С. ФГВ, 1968, 4, 4, 469.

Поступила в редакцию 25/II 1987,
после доработки — 7/VII 1987

АВТОМОДЕЛЬНЫЙ РЕЖИМ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВОБОДНОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ПЛАМЕНИ В ПЕРЕМЕШАННЫХ ГАЗОВЫХ СМЕСЯХ

Ю. А. Гостинцев, А. Г. Истратов, Ю. В. Шуленин
(Москва)

Л. Д. Ландау считал, что гидродинамическая неустойчивость пламени, которую он теоретически обнаружил [1], должна сама по себе приводить к возникновению турбулентного движения и к турбулентному режиму распространения фронта горения уже при числах Рейнольдса $Re = u_n R / \nu \approx 1$ (u_n — нормальная скорость горения, R — радиус видимого фронта). Как показывают эксперименты, свободное сферическое или цилиндрическое ламинарное пламя от слабого источника зажигания в отсутствие каких-либо существенных внешних влияний (жесткая стенка, препятствия, влияние архимедовых сил) действительно теряет устойчивость, становится турбулентным и самоускоряющимся, но при $Re \gtrsim 10^3 \div 10^5$.

Обработка экспериментальных данных (табл. 1) приводит к выводу о существовании автомоделного режима распространения видимого фронта полностью развитого турбулентного пламени. В таком режиме