

АНОМАЛЬНОЕ ГОРЕНИЕ ДЛИННЫХ ПОРОХОВЫХ ТРУБОК В РАКЕТНОЙ КАМЕРЕ

УДК 662.313 + 536.46

А. Г. Истратов, В. Н. Маршаков, Г. В. Мелик-Гайказов

Институт химической физики им. Н. Н. Семенова РАН, 117977 Москва

Экспериментально исследована граница устойчивого горения пороховых зарядов различной длины в модельной камере сгорания ракетного двигателя. Определено значение критической аппаратурной константы, при которой наблюдается погасание пороха. Для длинных зарядов обнаружены режимы горения, при которых давление в камере может быть существенно ниже уровня, соответствующего стационарному режиму горения. Обсуждены причины возникновения подобных режимов горения.

Аномальное горение в камере сгорания ракетного двигателя (РД) является одним из ярких примеров нестационарного горения пороха. Оно возникает, когда характерное время истечения продуктов сгорания из ракетной камеры τ_k близко к времени релаксации михельсоновского слоя пороха τ_n . В этом случае вместо ожидаемого режима горения при постоянном давлении, определяемом по уравнению баланса массы, происходит погасание пороха или же его сгорание в несколько приемов («чихание»). Линейная теория, предложенная Я. Б. Зельдовичем [1], предсказывает устойчивое горение пороха в РД, если аппаратурная константа камеры $\chi = \tau_k/\tau_n$ превышает критическое значение χ_* . В случае $\chi < \chi_*$ стационарный режим горения пороха в РД невозможен. Нелинейная теория [2] предсказывает погасание пороха при $\chi < \chi_*$ при достаточной амплитуде колебаний давления.

О. И. Лейпунский экспериментально показал, что самопроизвольное затухание пороха в РД наблюдается в случае, когда давление в камере сгорания поднимается до величины, соответствующей установлению звукового течения в сопле, при малой величине свободного объема V . Для больших значений V при наступлении звукового запираения затухание не происходило, что согласуется с представлениями теории. Величина χ_* , при которой наблюдалось самопроизвольное затухание пороха, была определена в экспериментах с зарядами торцевого горения и с канальными пороховыми зарядами небольшой длины (при отсутствии раздувания) [3]. Полученное значение $\chi_* = 2$ заметно отличалось от предсказанного теорией [1].

При исследовании влияния длины канального порохового заряда на границы устойчивости горения по давлению обнаружено, что самопроизвольному затуханию длинных зарядов предшествует их длительное горение практически при постоянном давлении в камере сгорания [3]. Период времени наблюдаемого цикла стабильного сгорания зависел от условий проведения опыта. Было показано, что пороховой заряд, сгорающий аномально (в несколько приемов) при выбранных параметрах заряжения, может сгореть в один прием при увеличении навески воспламенителя в два раза. Учитывая, что типичное значе-

ние времени полного сгорания составляло $\sim 0,5-1$ с, полученный эффект затруднительно объяснить влиянием воспламенительного периода.

Таким образом, явление самопроизвольного затухания заряда в РД, как показали эксперименты [3], не зависит от формы порохового заряда, а определяется параметрами, предсказанными теорией [1]. Однако диаграммы давления в области $\chi = \chi_*$ оказались существенно различными в зависимости от длины заряда и условий проведения эксперимента. Объяснение полученным результатам дано не было.

Значение константы χ_* рассчитано в работе [4]. Было показано, что неполнота тепловыделения, имеющая место при малых давлениях, оказывает дестабилизирующее действие на устойчивость горения пороха в РД. Наиболее сильное влияние этого фактора на устойчивость горения пороха в РД проявляется в камерах торцевого горения. В этом случае суммарная поверхность горения S , как правило, значительно меньше, чем у канального заряда. Уменьшение поверхности горения при сохранении неизменной величины свободного объема V должно приводить к уменьшению предельного давления устойчивого горения в РД. Действительно, связь между аппаратурной константой χ , давлением в камере p и поверхностью горения S имеет вид $\chi \sim (V/S)p^{\nu+1}$, где ν — барический показатель в законе горения.

В работе [5] экспериментально определена величина χ_* в опытах с шашкой торцевого горения с непрерывно уменьшающейся поверхностью горения. Однако точное сравнение экспериментальных данных [5] и теоретических расчетов [4] затруднено переменной ν в этой области давлений. (Изменение барического показателя должно оказывать сильное влияние на величину χ , см. [2].)

Применение канальных пороховых многошашечных зарядов с небольшой толщиной горящего свода позволяет получить достаточную поверхность горения при небольших размерах камеры сгорания. При этом самозатухание заряда должно происходить в области достаточно высоких давлений, где неполнотой тепловыделения можно пренебречь. Экспериментальных данных о предельных режимах горения таких зарядов крайне мало, и их детальное изучение представляет научный интерес.

Эксперименты проведены в модельном РД с внутренним диаметром 50 и длиной камеры сгорания 150 мм. Для коротких пороховых шашек свободный объем в РД заполнялся вкладышами. Пороховой заряд из нескольких десятков тонкосводных пороховых трубок жестко крепился к дну двигателя. Применение такого заряда позволяло независимо варьировать критерии Победоносцева Π для наружной части заряда и порохового канала ($\Pi = S/F$, где S — поверхность горения, F — проходное сечение для газового потока). Соотношение начальной наружной поверхности трубки к начальной поверхности порохового канала составляло $S_n/S_b \approx 3$. Здесь и далее индекс «н» соответствует наружной поверхности, а индекс «в» — внутренней. Типичные значения параметров заряжания лежали в интервале $\Pi_n < 50$, $50 < \Pi_b < 200$. Учитывая, что $S_n/S_b \approx 3$, т. е. начальный газоприход от наружной поверхности значительно превосходил газоприход от поверхности порохового канала, можно было пренебречь влиянием раздувания (увеличения скорости горения при обдуве поверхности) на среднее давление в РД для пороховых зарядов с достаточно длинными каналами.

В экспериментах использовали различные марки порохов, в том числе пироксилин, различные баллиститные пороха с малыми добавками или без них и смесевой состав на основе перхлората аммония.

Толщина горящего свода для применяемых трубок составляла 0,75–1,5 мм. Воспла-

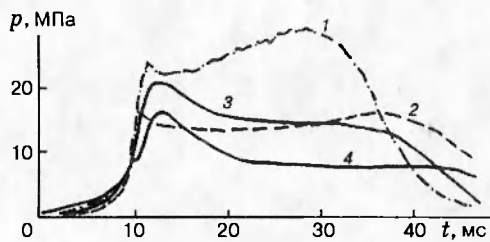


Рис. 1

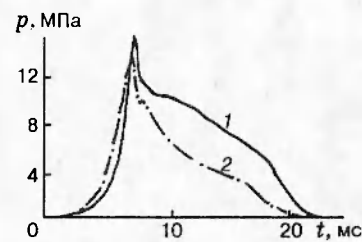


Рис. 2

Рис. 1. Диаграммы давление — время для режимов устойчивого горения пороха:

1 — $\Pi = 120$, $p_{\text{расч}} = 7$ МПа, $\chi = 2,1$; 2 — $\Pi = 180$, $p_{\text{расч}} = 14$ МПа, $\chi = 4,0$; 3 — $\Pi = 90$, $p_{\text{расч}} = 13$ МПа, $\chi = 4,8$; 4 — $\Pi = 90$, $p_{\text{расч}} = 24$ МПа, $\chi = 8,0$

Рис. 2. Самопроизвольное потухание коротких зарядов пороха:

расчетное давление в опытах, МПа: 1 — 5,5 ($\chi = 0,6$), 2 — 3,8 ($\chi = 0,6$)

менение осуществлялось навеской коллоксилиновой ваты. Давление воспламенителя $p \approx 5-15$ МПа. Использовалось сопло без расширяющейся части. Для гарантированного воспламенения в начальный момент горения сопло закрывалось мембраной, разрывавшейся при давлении, близком к ожидаемому стационарному. Момент разрыва мембраны фиксировался фотодиодом, расположенным вблизи сопловой части. Запись давления осуществлялась индукционным датчиком ДД-10, расположенным в средней части камеры сгорания. Сигнал от датчика усиливался индикатором давления ИД-2И и далее регистрировался с помощью светолучевого осциллографа Н-117. Инерционность системы регистрации давления ~ 1 мс. Диапазон исследуемых давлений $4 < p < 40$ МПа.

Эксперименты показали, что характер горения и вид получаемых в экспериментах диаграмм давление — время различны в зависимости от аппаратурной константы χ и критерия Победоносцева для порохового канала.

При $\chi > 2$ порох горит устойчиво (рис. 1), а на зависимостях $p(t)$ есть участки с уровнем давления, соответствующим стационарному режиму. Вместе с тем наблюдаются пики, давление в которых существенно выше стационарного уровня. Начальные всплески давления не могут быть объяснены влиянием воспламенителя. Амплитуда пиков не коррелирует с величиной критерия Победоносцева.

Для коротких зарядов ($\Pi < 50$) наблюдается погасание пороха при $\chi < 2$ (рис. 2). Видно, что сначала давление падает до расчетного значения, а затем сразу происходит опорожнение камеры. Расчетное характерное время опорожнения камеры сгорания 1–2 мс.

В случае длинных зарядов ($\Pi > 50 \div 100$) возможно сгорание без затухания и при $\chi < 2$. На рис. 3 приведены типичные диаграммы давления в этой области параметров. Потухание произошло в опыте 4, в остальных опытах заряд сгорел полностью. Зависимости 1, 2, 2' и 3 имеют заметную деградацию, которая не может быть объяснена увеличением размера порохового канала. При подробном рассмотрении аналогичных зависимостей можно различить несколько участков практически постоянного давления, разделенных между собой периодами с достаточно быстрым понижением давления примерно на 15–20 %.

Обращает на себя внимание линия 3, которая демонстрирует сгорание заряда при давлении в ~ 2 раза ниже, чем расчетное. (Полное время такого сгорания пропорционально увеличивается.)

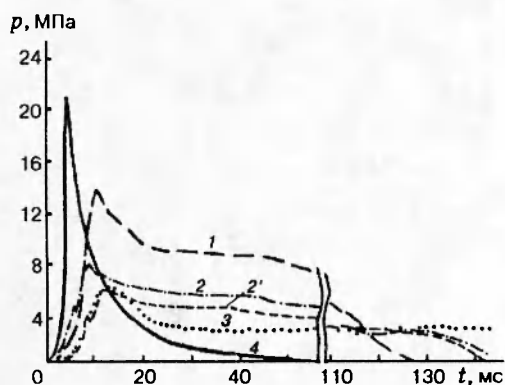


Рис. 3

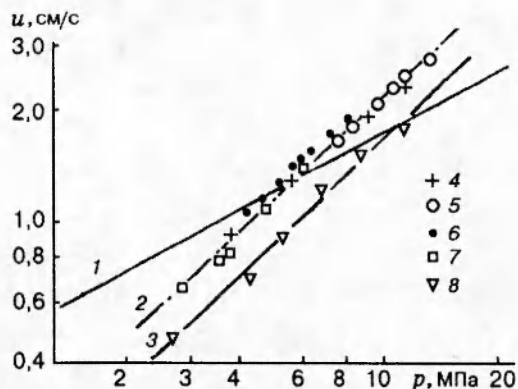


Рис. 4

Рис. 3. Характерные диаграммы давление — время для режимов аномального горения: 1 — $\Pi = 130$, $p_{расч} = 6$ МПа, $\chi = 1,1$; 2, 2' — $\Pi = 170$, $p_{расч} = 5$ МПа, $\chi = 0,7$; 3 — $\Pi = 170$, $p_{расч} = 5$ МПа, $\chi = 0,8$; 4 — $\Pi = 60$, $p_{расч} = 3$ МПа, $\chi = 1,7$

Рис. 4. Зависимости скорости горения пороха от давления: 1 — стационарная зависимость; 2 — расчетные значения скоростей, полученные по данным рис. 3; 4, 8 — опыты с потуханием заряда (4 соответствует кривой 4 на рис. 3); 5–7 — расчет диаграмм (соответственно линии 1, 2 и 3 на рис. 3) со сгоревшим зарядом; 3 — расчетные значения скоростей горения для опыта с параметрами заряжения, близкими к тем, что использовались в опыте, представленном на рис. 3 кривой 4

В зависимости от условий воспламенения могут быть получены диаграммы с давлением в начальном периоде несколько выше расчетного (см. рис. 3, кривая 1).

В опытах 2 и 2' давления в начальном периоде близки к расчетному, но несколько различны, несмотря на одинаковые условия опыта.

Таким образом, сгорание заряда в этой области параметров заряжения происходит фактически в аномальном режиме, хотя внешне диаграммы среднего (по объему камеры) давления напоминают диаграммы стабильного горения. При $\chi < 0,5$ в настоящих экспериментах всегда происходило погасание для трубок любой длины.

Из зависимостей $p(t)$ рассчитана скорость горения пороха с помощью уравнения баланса массы при истечении:

$$\frac{V}{f} \frac{dp}{dt} = u\rho S - A\rho\sigma.$$

Здесь f — сила пороха; t — время; u — средняя по заряду скорость горения пороха; ρ — плотность пороха; σ — площадь сечения сопла. Величина производной dp/dt рассчитывалась по экспериментальным кривым $p(t)$ (использовалась та часть кривой, которая соответствует падению давления после вылета предохранительной мембраны).

Результаты расчетов для диаграмм, приведенных на рис. 3, показаны на рис. 4. Полученная зависимость средней по заряду скорости горения от давления оказывается значительно сильнее, чем соответствующая стационарная. Это свидетельствует о нестационарном характере горения заряда [1]. Из рис. 4 также следует, что существуют такие режимы горения заряда в ракетной камере (см. линию 2 на рис. 3), в которых средняя скорость горения значительно меньше стационарного значения.

Аппаратурная константа вычислялась с использованием известных соотношений:

$\tau_k = V/Af\sigma$, $\tau_{II} = \alpha/U^2$, где A — коэффициент истечения; α — коэффициент теплопроводности пороха.

Найденное экспериментальное значение $\chi_* = 2$ совпадает с определенным в [3]. Аналогичные результаты получены в [7] для канального порохового заряда с небольшим удлинением. Следует отметить, что величина χ_* оказалась одной и той же для всех исследованных рецептур порохов, в том числе и для порохов заведомо неоднородных. Надо отметить также, что значения ν для примененных порохов различны ($\nu = 0,3 \div 0,7$). По теории величина χ должна заметно зависеть от ν , однако в эксперименте этого не наблюдалось.

Из анализа приведенных экспериментальных данных следует, что объяснить все обнаруженное многообразие режимов горения вблизи пределов устойчивости, основываясь только на теоретических результатах [1], невозможно. Представляется полезным рассмотреть следующие соображения.

Известно, что наряду с изменениями давления (среднего по камере сгорания) в пороховых каналах могут иметь место волны давления, соответствующие характеристическим частотам канала [8]. Амплитуда этих волн чувствительна к конструкции порохового заряда и камеры сгорания. Было показано, что в пороховых каналах с относительным удлинением $L/d > 14$, при интенсивном воспламенении регистрируются высокочастотные колебания давления, соответствующие колебаниям продольных мод. Эти колебания не регистрируются в коротких каналах ($L/d < 14$, L — длина канала, d — внутренний диаметр канала [8]) и при мягком воспламенении в каналах любой длины. Вопрос о количественной связи амплитуды высокочастотных колебаний со скоростью горения пороха остался открытым [8, 9].

Разрешающая способность используемой методики регистрации давления не позволяет фиксировать высокочастотные колебания. Тем не менее можно привести следующие доводы в пользу наличия волн давления в пороховых каналах в наших опытах.

Выгорание пороха на погасших трубках было неоднородным по длине. Повышенное выгорание наблюдалось в области середины канала и на расстоянии, равном $\sim 2/3$ длины трубки от глухого торца, в соответствии с распределением пучностей скорости для продольных стоячих акустических волн с модами $1/4$, $3/4$ и $7/4 \lambda$.

При использовании трубок значительной длины ($\Pi > 250 \div 300$) на потухших зарядах происходит растрескивание трубок в их донной части и вырывание трубок из гнезд. Оценка необходимых для этого механических усилий приводит к величинам давления у дна трубок порядка сотен атмосфер, тогда как гидравлический перепад давления в канале трубок не должен превышать нескольких десятков атмосфер. Это свидетельствует о наличии в канале волн давления значительной амплитуды.

В пользу представления о том, что предполагаемые волны давления в данном случае относятся к продольным модам, говорит также зависимость времени появления пика среднего давления от длины шашек и его независимость от диаметра канала, толщины свода и времени сгорания.

Не исключено, что начальный пик давления является проявлением колебаний скорости горения неакустической природы, связанных с возможностью автоколебательного режима горения, тем более что прорыв мембраны в начальный момент работы двигателя создает сильные возмущения, способные обеспечить жесткое возбуждение автоколебаний.

Появление эффектов акустической неустойчивости горения вблизи границы устойчивой работы камеры в целом при $\chi \approx \chi_*$ представляется естественным для камер с высокой плотностью заряжения, использовавшихся в наших опытах. Действительно, усиление

акустических волн на поверхности горения будет наибольшим в случае, когда период акустических колебаний $\tau_{ак} \approx \lambda/c$ (c — скорость звука) близок к времени релаксации пороха τ_p , а длину волны λ для продольных колебаний по порядку величины можно считать соответствующей длине камеры сгорания. С другой стороны, условие $\chi \sim \chi_*$ означает, что время релаксации пороха по порядку величины совпадает с временем истечения из камеры, которое можно записать в виде $\tau_k \approx l/c$, где $l = V/\sigma$ — приведенная длина камеры. Акустическая неустойчивость внутри камеры сгорания и неустойчивость работы камеры в целом будут, таким образом, проявляться одновременно, если $l \approx \lambda$. При высокой плотности заряжения отношение F/σ не слишком велико и приведенная длина $l = (V/F)/(F/\sigma)$ вполне может сравниться по порядку величины с длиной волны продольных колебаний $\lambda \approx V/F$.

Подведем итоги проведенного исследования. Экспериментально определены условия устойчивого горения в ракетной камере для трубчатых пороховых многошашечных зарядов различной длины при использовании порохов различных составов. Получены критические значения аппаратурной константы, определяющие эти условия.

Вблизи границы устойчивого горения получены разнообразные режимы нестационарного горения, часть которых, по-видимому, имеет волновую природу.

Обнаружены режимы сгорания, при которых давление в двигателе в течение длительного времени оказывается ниже уровня, соответствующего стационарному режиму горения. Таким образом, явно аномальный режим горения внешне выглядит как стационарный, и сгорание заряда происходит в один прием.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я. Б. Об устойчивости режима горения пороха в полузамкнутом объеме // ПМТФ. 1963. № 1. С. 67–76.
2. Новожилов В. В. Нестационарное горение твердых ракетных топлив. М.: Наука, 1973.
3. Лейпунский О. И. К вопросу о физических основах внутренней баллистики: Дис... д-ра физ.-мат. наук. М., 1945.
4. Гостинцев Ю. А., Суханов Л. А. К теории устойчивости горения пороха в полузамкнутом объеме // Физика горения и взрыва. 1974. Т. 10, № 4. С. 818–826.
5. Гостинцев Ю. А., Маршаков В. Н., Суханов Л. А., Лебедев П. И. К аперидической неустойчивости горения пороха в полузамкнутом объеме // Физика горения и взрыва. 1976. Т. 12, № 5. С. 778–780.
6. Зенин А. А. Процессы в зонах горения баллистических порохов // Физические процессы при горении и взрыве. М.: Атомиздат, 1980. С. 68–105.
7. Маргулис В. М., Марголин А. Д., Левичек М. И. и др. Автоколебания и низкочастотная неустойчивость горения пороха // Физика горения и взрыва. 1970. Т. 6, № 2. С. 162–166.
8. Вибрационное горение в некоторых модельных устройствах / Под ред. А. Д. Марголина. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1970.
9. Браунли В. Нелинейная продольная неустойчивость горения в РДТТ // Ракетная техника и космонавтика. 1964. Т. 2.

Поступила в редакцию 5/VII 1995 г.,
в окончательном варианте — 3/VI 1996 г.