

Θ_0	$\varepsilon_{p_1/p_0}, \%$	$(p' - p_s)/p', \%$	$\varepsilon_{\gamma_1/\gamma_0}, \%$	$(\gamma' - \gamma)/\gamma', \%$	$\varepsilon_{m_1/m_0}, \%$
4	-33,6	10,3	-67,2	43,7	16,8
8	-16,8	1	-33,6	10,2	3,4
12	-11,2	0,1	-22,4	4,3	5,6

$w = 1,5$ в режиме отрыва. Штрихом помечены результаты численного решения. Заметна быстрая сходимость приближенных формул к численному решению с ростом Θ_0 .

Сопоставление полученных результатов с данными приближенного анализа [3] показывает, что выражения для T_{\max} , q_s и T'_0 из [3] — первые приближения выполненного решения. Сравнение первого и второго приближения приведено в таблице. Видно, что вторые слагаемые в полученных решениях для реальных Θ_0 вносят измеримые поправки.

В заключение поясним смысл условия (3.14), которое в размерных величинах может быть записано в виде

$$u_m < T_{\Gamma} u_0 c / Q a_0. \quad (4.1)$$

Найденное условие конкретизирует вытекающее из физических соображений условие существования зон прогрева и химической реакции (3.1). Нарушение (4.1) означает переход из режима отрыва в вырожденный режим.

Поступила в редакцию
22/V 1979

ЛИТЕРАТУРА

1. Р. М. Зайдель, Я. Б. Зельдович. ПМТФ, 1962, 4.
2. А. Г. Мержанов, А. К. Филоненко. Докл. АН СССР, 1963, 152, 1.
3. Б. И. Хайкин, Э. Н. Руманов. ФГВ, 1975, 11, 5.
4. В. С. Берман, Ю. С. Рязанцев. ПММ, 1972, 36, 4.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ РЕЖИМОВ АВТО- И ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ ПОРОХА

В. Н. Симоненко, В. Е. Зарко, К. П. Куценогий
(Новосибирск)

В соответствии с выводами феноменологической теории [1] при горении пороха в самоподдерживающемся режиме в некоторой области изменения параметров k и r должна наблюдаться собственная частота колебаний скорости горения f_0 , определяемая соотношением

$$f_0 = \sqrt{k} / 2\pi r \cdot u^2 / \kappa. \quad (1)$$

Здесь u — скорость горения; κ — температуропроводность; $k = \beta(T_s - T_0)$; $\beta = \partial \ln u / \partial T_0$; T_s и T_0 — температуры поверхности и начальная; $r = \partial T_s / \partial T_0$.

Экспериментальное обнаружение собственных частот колебаний скорости горения могло бы послужить прямым критерием проверки адекватности теоретической модели изучаемому явлению.

Отдельные сообщения о существовании резонансного отклика скорости горения на периодические возмущения потока излучения содер-

жаты в работах [2, 3], однако систематические исследования в этой области до сих пор не проводились. Подробные измерения собственной частоты колебаний скорости горения пороха представляют большой интерес с точки зрения экспериментального обоснования нестационарной теории горения, которая дает удобные в практическом исполнении методы решения широкого круга задач по переходным процессам при горении пороха. Изучение колебательных режимов горения имеет и важный практический аспект. В ряде экспериментальных работ [4—7] показано, что самоподдерживающееся горение ряда порохов сопровождается периодическими пульсациями свечения, температуры, электропроводности и скорости оттока продуктов сгорания, которые предположительно обусловлены колебаниями скорости горения. При этом некоторые частоты пульсаций, наблюдаемые при горении в приборах постоянного давления, сохраняют свое значение и в опытах с полузамкнутым объемом [4, 5], т. е. существует тесная связь между автоколебаниями скорости и низкочастотной неустойчивостью горения порохов.

Цель настоящей работы — изучить характер колебаний скорости горения пороха в самоподдерживающемся режиме, провести систематические измерения частот резонансного отклика скорости горения на периодические возмущения внешнего потока излучения, а также сопоставить данные по частотам авто- и резонансных колебаний скорости горения и сравнить экспериментальные результаты с предсказаниями нестационарной теории горения порохов [1, 8].

Экспериментальная методика

Измерение нестационарной скорости горения пороха производилось на основе регистрации величины реактивной силы продуктов сгорания с помощью модифицированного датчика малых сил [9]. Перевод значений реактивной силы в величины скоростей горения осуществлялся по данным стационарных градуировок, поскольку релаксационные процессы в газовой фазе происходят на 1—2 порядка быстрее, чем в конденсированной¹ [1].

В качестве источника потока излучения использовалась мощная ксеноновая лампа. Для получения синусоидально изменяющегося во времени светового потока применялись дисковые прерыватели [10] с глубинами модуляции интенсивности излучения 6 и 100%. Опыты проводились на образцах порохов Н, Н + 1% сажи (Н + С), Н + 1% РbО (Н + К) и Н + 1% РbО + 1% С (Н + К + С). Добавки вводились в мелкодисперсном виде в порошки измельченных основных составов путем смешивания, после чего образцы прессовались с подогревом до 80°C при давлении $6 \cdot 10^3$ кг/см². Приготовленные таким же способом контрольные образцы из базовых составов имели первоначальную плотность и идентичные исходным составам характеристики горения. Сравнительные испытания образцов диаметром от 8 до 16 мм показали, что вариация диаметра не приводит к заметному изменению исследуемых характеристик, поэтому основная серия опытов проводилась на образцах диаметром 10 мм.

Подготовка образцов к испытаниям заключалась в наклеивании их на пенопластовую подложку и бронировании внешней поверхности тонким слоем слюды, сохранявшей свою форму во время опыта. Этим достигалось исключение влияния внешней среды и сохранение одномерности потока газообразных продуктов сгорания. В опытах с повышенной начальной температурой образец нагревался в кольцевой электропечи ~10 мин. Температура контролировалась термопарой, заклеенной внутри

¹ Косвенным доказательством справедливости теории [1] служат результаты измерений температуры газа, которая в исследованных режимах изменяется в полном соответствии с гипотезой о квазистационарности газовой фазы.

образца. Средняя скорость горения определялась по времени сгорания образца пороха известной длины.

Влияние поглощения света в продуктах сгорания на скорость горения проверялось в экспериментах с облучением факела интенсивным потоком излучения, действующим параллельно горячей поверхности. Установлено, что слабое поглощение излучения факелом практически не сказывается на величине скорости горения, поэтому этот эффект в обсуждении результатов не учитывался. Регистрация сигналов фотодиода, контролирующего частоту внешнего потока излучения, и датчика реактивной силы продуктов сгорания производилась на шлейфовом осциллографе типа Н-117.

Режим самоподдерживающегося горения

При горении исходного состава (порох Н) в условиях атмосферного давления сигнал реактивной силы (скорости горения) имеет сложный характер (рис. 1). Визуально в широком наблюдаемом спектре можно выделить две группы колебаний — с частотами 50—150 и 3—5 Гц. Колебания относительно высокой частоты, как показала скоростная киносъемка, обусловлены появлением и исчезновением на горячей поверхности локальных скоплений микропузырьков, что приводит к неравномерности выгорания по сечению образца. Колебания низкой частоты, вероятно, связаны с тепловой релаксацией прогретого слоя в κ -фазе пороха.

Существенная неоднородность (очагово-пульсирующий характер) горения образцов пороха Н не позволяет надежно определять собственные частоты колебаний скорости горения при $p = 1$ атм. В случае горения при $p = 1$ атм порохов Н + С и Н + К сигнал реактивной силы более однороден и содержит колебания почти синусоидальной формы (см. рис. 1). Частота этих колебаний скорости горения закономерно увеличивается, когда величина скорости горения возрастает за счет повышения интенсивности потока излучения или уровня начальной температуры (табл. 1).

С повышением давления колебания сигнала реактивной силы продуктов сгорания порохов Н и Н + С приобретают резко пульсационный характер с острыми пиками. После сжигания при $p = 5—20$ атм на дне

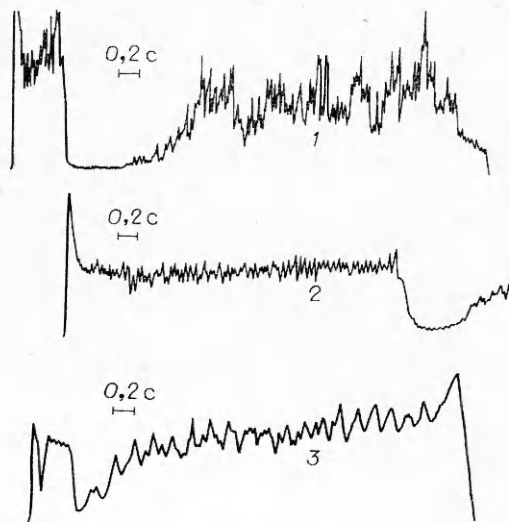


Рис. 1. Осциллограммы записи сигнала реактивной силы F при горении порохов в самоподдерживающемся режиме, $p = 1$ атм, $T_0 = 20^\circ\text{C}$.

1 — Н; 2 — Н+С; 3 — Н+К.

бомбы остаются углеродистые чешуйки, закрывающие все сечение образца. При горении образцов Н + К чешуйки не образуются, сигнал реактивной силы качественно не изменяется в диапазоне давлений 1—40 атм. Однако амплитуда периодических низкочастотных колебаний скорости горения с ростом давления значительно уменьшается (при $p = 40$ атм ее относительная величина составляет 3—5%). Поскольку нет оснований определенно утверждать, что именно эти частоты являются резонансными, проведены опыты при воздействии на горящий образец пороха внешнего модулированного светового потока.

Т а б л и ц а 1

Состав	p , атм	T_0 , °С	q , кал/ (см ² ·с)	u , см/с	f , Гц	Вид колебания
Н	1	20	0	0,08	2—3; 50—150	Сложный спектр
	5	20	0	0,15	3÷5	Пульсации
	20	20	0	0,33	0	Слабо выраженные пульсации
	40	20	0	0,54	0	
Н+С	1	20	0	0,08	15	Синусоида
	1	60	0	0,105	18	»
	1	120	0	0,18	35	»
	1	20	5	0,12	25	»
	1	20	10	0,16	40	»
	1	20	20	0,22	80	»
	5	20	0	0,15	3	Пульсации
	20	20	0	0,33	5	»
	40	20	0	0,54	15	»
Н+К	1	20	0	0,08	4,5	Синусоида
	1	120	0	0,125	9	»
	5	20	0	0,15	8	»
	20	20	0	0,42	25	»
	40	20	0	0,8	0	Амплитуда мала ~5%

Горение при действии гармонически изменяющегося потока излучения

Измерения отклика скорости горения на периодические возмущения потока излучения проводились на образцах Н+С ($p = 1$ атм), Н+К ($p \geq 1$ атм), при горении которых в самоподдерживающемся режиме наиболее четко выражены автоколебания. Уровень скорости горения при 1 атм варьировался за счет изменения начальной температуры в пределах 20—120°С, либо за счет изменения уровня постоянной составляющей внешнего потока излучения. При повышенных давлениях опыты проводились только при исходных значениях скорости горения, задаваемых уровнем давления и комнатной начальной температурой образца.

Уровень переменной составляющей светового потока подбирался таким образом, чтобы относительная величина полуразмаха колебаний сигнала реактивной силы не превышала на низких частотах (вдали от резонанса) 10%. При этом соответствующая величина для скорости горения составляла 5%, так что можно говорить о малости возмущения скорости горения и выполнении теоретического предположения, которое заложено в основу анализа устойчивости процесса горения методом малых возмущений [1].

Типичный вид сигнала реактивной силы в колебательном режиме горения показан на рис. 2. С ростом частоты модуляции постоянного по величине потока излучения размах колебаний сигнала отклика скорости горения вначале увеличивается, затем падает. Максимум амплитуды отклика соответствует резонансной частоте (рис. 3). Резонансные частоты для различных величин скоростей горения приведены в табл. 2, где температуры поверхности горения взяты из экспериментов [11], производная $r_p = \partial T_s / \partial T_0$ подсчитана по соотношению $r = \beta \partial T_s / \partial \ln u$ с использованием единой зависимости вида $u = \text{const} \cdot \exp(-E/RT_s)$, где $E = 20$ ккал/моль [1]. Значения производной $\beta = \partial \ln u / \partial T_0$ взяты из собственных экспериментов, за исключением данных для Н+К при повы-

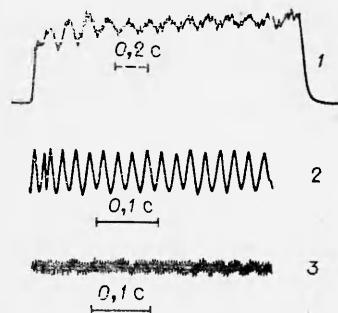


Рис. 2. Осциллограммы записи сигнала F при горении пороха $H+C$ под действием синусоидально изменяющегося внешнего светового потока ($q = q_0 + \Delta q \sin \omega t$ при $\Delta q/q_0 = 0,1$).

1 — частота внешнего воздействия меньше резонансной частоты; 2 — частота внешнего воздействия близка к резонансной частоте; 3 — частота внешнего воздействия больше резонансной частоты.

$\kappa = 1,25 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{с}$ [8] по соотношению (1). Это же соотношение использовалось для определения величины r_0 по экспериментально измеренной частоте f_0^p .

Обсуждение экспериментальных результатов

Предваряя обсуждение данных по собственным частотам колебаний скорости горения, необходимо сделать несколько замечаний о характере реагирования на поверхности при горении баллиститных порохов. Очагово-пульсирующий характер горения этих составов при пониженных начальных температурах и давлениях не позволяет в полной мере использовать для анализа горения представления нестационарной теории [1, 8], основанной на допущениях о равномерном и однородном выгорании. С ростом уровней начальной температуры и давления среды, как правило, одномерность горения улучшается. Однако различие скоростей реагирования компонентов приводит к образованию на поверхности горения углеродистых остатков, способных при повышенных давлениях объединяться в крупные чешуйки. Наиболее четко это явление выражено при горении порохов H и $H+C$ в диапазоне давлений 5–20 атм (для $H+C$ и при более высоких давлениях [7]). Наличие чешуек изменяет характер оттока газов от поверхности, способствует появлению пульсаций свечения [5], температуры [7], реактивной силы. Опираясь на данные визуализации горячей поверхности и анализируя характер изменения сигналов температуры газа и реактивной силы, можно сделать вывод, что для исследованных составов наиболее однородное выгорание реагирующей поверхности происходит либо в случае горения пороха $H+C$ при атмосферном давлении и повышенной начальной температуре, либо под воздействием светового потока, а также при горении пороха $H+K$ во всем исследованном диапазоне давлений.

Экспериментальные данные для этих составов целесообразно использовать при сопоставлении с теорией. При этом необходимо иметь в виду замечание, сделанное в [1], о неправомочности отождествления различных экспериментально наблюдаемых колебаний характеристик процесса горения (температуры, свечения и т. п.) с собственными колебаниями скорости горения пороха. Причинами появления периодических пульса-

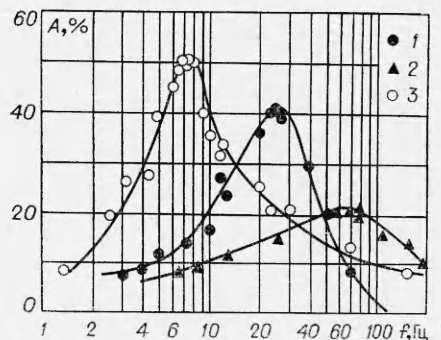


Рис. 3. Зависимость амплитуды отклика скорости горения от частоты внешнего возмущения.

1 — $H+C$ при $u = 0,11 \text{ см/с}$; 2 — $H+C$ при $u = 0,20 \text{ см/с}$; 3 — $H+K$ при $u = 0,12 \text{ см/с}$.

шенных давлениях, где условно принято то же β , которое соответствует горению при $p = 1$ атм. Расчет собственной частоты f_0^p проводился при

Таблица 2

Состав	u , см/с	T_s , °C [11]	$\beta \cdot 10^3$, 1/K	k	r_p	f_0^D , Гц	f_0^S , Гц	r_s	$\frac{r_p}{r_s}$
Н+С	$u(q)$								
	0,08	250	7,2	1,6	0,39	2,6	15	0,07	5,6
	0,10	255	6	1,4	0,33	4,6	20	0,08	4,1
	0,12	260	5,4	1,3	0,31	6,7	25	0,08	3,9
	0,15	270	4,3	1,1	0,25	12	40	0,08	3,1
	0,18	280	3,6	0,9	0,22	18	55	0,07	3,1
	0,20	290	3,4	0,9	0,21	23	65	0,07	3
	0,22	300	3,0	0,8	0,20	28	85	0,06	3,3
	$u(T_0)$								
	0,08	250	7,2	1,6	0,39	2,6	15	0,07	5,6
	0,10	255	8,2	1,6	0,46	3,5	17	0,09	5,1
	0,12	260	9,5	1,7	0,54	4,4	20	0,12	4,5
	0,15	270	11	1,8	0,62	6,2	25	0,15	4,1
	0,18	280	12	1,8	0,70	7,9	35	0,16	4,4
Н+К	$u(p)$								
	0,08	250	2,5	0,6	0,14	4,5	4,5	0,14	1
	0,15	280	2,5	0,6	0,15	15	8	0,28	0,5
	0,20	300	2,5	0,7	0,16	25	10	0,39	0,4
	0,30	340	2,5	0,8	0,19	47	16	0,55	0,3
	0,40	360	2,5	0,9	0,20	79	25	0,63	0,3
	$u(T_0)$								
	0,08	250	2,5	0,6	0,14	4,5	4,5	0,14	1
	0,09	255	3,5	0,7	0,20	4,2	6	0,14	1,4
	0,10	260	5	0,8	0,28	4,2	7	0,14	2
0,12	270	8	1,2	0,47	4,3	9	0,22	2,1	

П р и м е ч а н и е. $u(q_0)$, $u(p)$, $u(T_0)$ отвечают способу изменения величины u за счет вариации соответствующего параметра.

ций горения могут быть, в частности неоднородности и неравномерности выгорания реагирующей поверхности, релаксационные процессы в газовой фазе и т. п.

Скачкообразное уменьшение частоты колебаний скорости горения пороха Н+С и изменение их формы (появление резких пульсаций) при повышении давления связано, как видно из анализа опытных результатов, с образованием и уносом с поверхности горения относительно плотных углеродистых чешуек, полностью закрывающих сечение образца. Очевидно, что периодичность такого процесса обусловлена сложным взаимодействием физико-механических и кинетических факторов (скорости накопления остатков неполного горения, прочностные характеристики углеродистого каркаса, скорость газообразования и др.). Поэтому нет достаточных оснований связывать частоту пульсационного горения этого пороха при $p > 1$ атм с собственной частотой колебаний скорости горения, в связи с чем изучение резонансного отклика для пороха Н+С при $p > 1$ атм не проводилось. И, напротив, совпадение частот резонансного отклика скорости горения на периодические внешние возмущения с собственными частотами колебаний правильной (синусоидальной) формы скорости горения порохов Н+С (1 атм) и Н+К (1–20 атм) в режиме самоподдерживающегося горения служит убедительным доказательством их тождественности.

Анализируя данные табл. 2 по резонансным частотам отклика скорости горения, можно отметить хорошее качественное согласие предска-

ываемого теорией повышения частоты собственных колебаний с ростом уровня скорости горения и наблюдаемого в эксперименте изменения частоты резонансных колебаний. Количественное сопоставление с предсказаниями теории рассмотрим подробнее для каждого из составов.

Экспериментально обнаружено, что величины β не равны в случае действия светового потока и начальной температуры. Расчет собственной частоты колебаний скорости горения проводился при использовании значений β , определенных для конкретных условий в отличие от работ [8, 12], где величины k и r берутся при эффективной начальной температуре, такой, что $u(q, T_0) = u(T_0^{\text{эфф}})$. Как видно из данных табл. 2, несоответствие расчетных и экспериментальных значений резонансных частот достигает 3—6 раз. Это несоответствие может быть обусловлено как несовершенством теоретического описания явления, так и погрешностями экспериментального определения величин T_s , r и β , входящих в расчетную формулу (1).

Уточнение теории за счет включения в рассмотрение зоны конечной толщины, в которой происходят химические реакции в k -фазе пороха, и учета специфики влияния реакций в газовой фазе должно производиться на основе математического моделирования. Оставаясь пока в рамках приближенной теории, оценим значение производной $r = \partial T_s / \partial T_0$, используя экспериментальные величины f_0^3 и k . Полученные таким образом $r \approx 0,1$ оказываются в 3—6 раз меньше рассчитанных по данным [11] и находятся в разумном согласии с [13], где отмечена очень слабая зависимость $T_s(T_0)$ для пороха Н. Найденные в режимах колебательного (периодического) горения значения r можно использовать для теоретического описания других переходных процессов при горении пороха Н + С. Сопоставление таких расчетов с соответствующими экспериментальными закономерностями будет служить основанием для дальнейшей проверки положений нестационарной теории горения.

Необходимо специально отметить обнаруженное в экспериментах различие частот резонансного отклика для непрозрачного пороха Н + С (коэффициент прозрачности $\sim 450 \text{ см}^{-1}$) в случаях, когда один и тот же уровень средней скорости горения задавался в одном варианте за счет повышения начальной температуры, а в другом — за счет действия постоянной составляющей потока излучения. Основной причиной наблюдаемого различия резонансных частот, по-видимому, является модификация закономерностей горения под действием света, что не соответствует «эквивалентной» в энергетическом плане замене действующего потока излучения эффективным повышением начальной температуры образца. Так, из прямых экспериментов, впервые проделанных в настоящей работе, следует, что величины температурного коэффициента скорости горения β для пороха Н + С, горящего под действием потоков излучения интенсивностью 5—15 кал/(см² · с), приблизительно в 2—3 раза меньше значений β для тех же уровней скорости в режиме самоподдерживающегося горения при повышенных T_0 (см. табл. 2). Можно предполагать, что при горении под действием потока излучения также ослабляется и зависимость температуры поверхности от начальной температуры образца, что находит отражение в величине коэффициента r , определенного из соотношения (1) по значениям резонансных частот отклика. Однако это предположение носит пока предварительный характер, поскольку нет достаточно разработанной теории горения непрозрачных порохов под действием света.

Анализируя данные по колебательным режимам горения катализированного пороха Н + К, следует обратить внимание на следующие особенности. Горение этого пороха характеризуется весьма слабой зависимостью скорости горения от начальной температуры образца. Поскольку экспериментальное определение малых величин β представляет сложную

техническую задачу, то приведенные в табл. 2 значения β могут иметь значительные погрешности (20—30%). Кроме того, как видно из рис. 3, значения частот резонансного отклика скорости горения определяются также с невысокой точностью (10—15%).

Данные по частотам резонансного отклика скорости горения пороха Н + К позволяют в соответствии с соотношением (1) рассчитывать значения параметра r , который при комнатной начальной температуре и атмосферном давлении оказывается приблизительно вдвое большим, чем в случае горения пороха Н + С, а затем еще более возрастает при увеличении начальной температуры и давления. Возникают трудности в интерпретации резонансных откликов при колебательном горении пороха Н + К в той области параметров, где $k < 1$, а $r > (\sqrt{k} - 1)^2$. Линеаризованный анализ устойчивости горения пороха, проведенный в [8], показывает, что в этой области параметров должно происходить «вязкое» затухание колебаний без резонансов. Но с учетом сделанных выше замечаний рассчитанные по данным экспериментов значения параметра $k = \beta(T_s - T_0)$ имеют сравнительно большие погрешности, и это может обусловить кажущееся попадание в область нерезонансного отклика на диаграмме устойчивости. С другой стороны, учет в теоретическом анализе нелинейных эффектов может привести к расширению областей с резонансным откликом на периодические возмущения. Чтобы проверить это последнее предположение, необходимо провести эксперименты по численному моделированию горения пороха под действием периодически изменяющегося потока излучения конечной амплитуды.

В опытах с катализированным порохом дополнительно исследовано влияние добавки сажи на резонансные характеристики скорости горения. Для этой цели проводились измерения резонансных частот на образцах, содержащих 1% С (Н + К + С). Величины резонансных частот для одинаковых скоростей горения составов Н + К и Н + К + С практически совпали (в пределах погрешностей экспериментального способа), несмотря на существенное увеличение коэффициента поглощения света при введении сажи (с 50 до ~ 1000 см⁻¹). Этот факт свидетельствует о слабом влиянии вариации эффективной глубины поглощения света на резонансные характеристики скорости горения катализированного состава. С другой стороны, сравнивая данные по составам Н + С и Н + К + С, можно сделать вывод, что введение катализатора приводит к изменению собственной частоты колебаний скорости горения пороха именно за счет модификации закономерностей реагирования в к-фазе пороха (изменение параметров β и r).

Основные итоги проведенных исследований можно суммировать следующим образом.

1. Впервые экспериментально показано, что для нитроглицеринового пороха при вариации условий внешней среды (начальной температуры, давления, среднего уровня светового потока) частота автоколебаний в диапазоне 5—80 Гц совпадает с резонансной частотой отклика скорости горения на действие синусоидального потока излучения. Зарегистрировано закономерное увеличение частоты резонанса с ростом скорости горения.

2. Полученные экспериментальные данные по собственным частотам колебаний скорости горения удается лишь качественно согласовать с расчетами по феноменологической теории горения, поскольку отсутствуют надежные сведения о зависимости скорости горения от температуры поверхности. Для количественной проверки теории необходимо планировать изучение других нестационарных режимов, теоретическое описание которых следует проводить со значениями констант, найденных из обработки экспериментов по резонансам скорости горения.

Поступила в редакцию
17/VII 1979

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. В. Новожилов. Нестационарное горение твердых ракетных топлив. М., Наука, 1973.
2. С. Милфейт, А. Баер, Н. Райан. РТК, 1972, 10, 10.
3. О. Я. Романов, В. С. Тархов, Г. Г. Шелухин. ФГВ, 1977, 13, 6.
4. В. С. Илюхин, П. Ф. Похил. ФГВ, 1971, 7, 3.
5. И. Б. Светличный, А. Д. Марголин, П. Ф. Похил. ФГВ, 1971, 7, 2.
6. Э. И. Максимов. ЖФХ, 1963, 37, 5.
7. В. Е. Зарко, Г. И. Леонов, В. Г. Григорьев. Физика горения и методы ее исследования. ЧГУ, Чебоксары, 1975, 4, 27.
8. Я. Б. Зельдович, О. И. Лейпунский, В. Б. Либрович. Теория нестационарного горения пороха. М., Наука, 1975.
9. В. Ф. Михеев, С. М. Борин. ФГВ, 1973, 9, 2.
10. А. А. Мельников. Теория и расчет фотозатворов. М., Машиностроение, 1973.
11. А. А. Зенин, Б. В. Новожилов. ФГВ, 1973, 9, 2.
12. И. Г. Ассовский. Канд. дис. М., ИХФ АН СССР, 1973.
13. Э. В. Конев. Канд. дис. Новосибирск, ИХИГ СО АН СССР, 1967.

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА СМЕШЕНИЯ СТРУЙ ГАЗОВ В СОПЛЕ ЛАВАЛЯ И ЕГО ВЛИЯНИЯ НА ИНВЕРСНУЮ НАСЕЛЕННОСТЬ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ

Б. Г. Ефимов, Л. А. Заклязьминский
(Москва)

В работе [1] теоретически обоснована высокая эффективность получения инверсной населенности молекул при мгновенном смешении потока термически возбужденного вспомогательного газа (типа N_2) с потоком холодного рабочего газа (например, CO_2). Эксперименты [2—4] показали, что величина инверсной населенности молекул рабочего газа (или коэффициента усиления) в значительной мере определяется процессом турбулентного перемешивания потоков вспомогательного и рабочего газов в сверхзвуковом сопле.

В последнее время выполнено большое количество экспериментальных исследований, в которых изучалось влияние характера смешения рабочего и вспомогательного газов в сопле Лавалья на коэффициент усиления в сверхзвуковом потоке. При этом, как правило, рассматривался или поперечный ввод рабочего газа в сверхзвуковой поток [5, 6], или ввод рабочего газа в слутный сверхзвуковой поток вспомогательного газа [7]. Однако ввод рабочего газа, по-видимому, не отвечает полностью требованиям идеального смешения, которые можно сформулировать в виде:

- 1) достижение максимального значения инверсной населенности равномерно по поперечному сечению потока на выходе из сопла;
- 2) получение однородных по сечению параметров потока (и состава смеси) без ударных волн на выходе из сопла;
- 3) охлаждение стенок сопла, особенно в окрестности его критического сечения;
- 4) минимальные потери полного давления на смешение газов. Чтобы представить возможность выполнения всех этих требований, необходимо кратко рассмотреть характер смешения струи газа, вводимой параллельно или под углом в поток другого газа.

Поскольку размеры сопла для получения значительной инверсии обычно невелики (высота критического сечения сопла $h_* = 0,3 \div 1,0$ мм), то и ввод рабочего газа (углекислоты) осуществляется, как правило, через отверстия с поперечным размером $d \leq 1$ мм, при этом течение в струе рабочего газа на выходе из канала, как показывают эксперимен-