

лась в смеси с максимальной нормальной скоростью горения, что характерно для гидродинамической неустойчивости;

б) действие пристеночной турбулентности на формирование ячеистой структуры пламени исключается вследствие большого объема камеры (пламя теряет устойчивость по прохождении 5% своего пути от точки воспламенения смеси до стенки камеры);

в) на возникновение неустойчивости сферического пламени могло бы влиять увеличение давления в камере [6, 7]. Но, как показали измерения, распространение пламени в объеме камеры происходит практически при постоянном атмосферном давлении.

Увеличение скорости распространения пламени (см. рис. 3) обязательно, по-видимому, появлению ячеистой структуры фронта пламени. Действительная поверхность сферического пламени с такой структурой будет больше по сравнению с идеально гладкой сферой, что должно приводить к ускорению горения.

Московский инженерно-строительный институт
им. В. В. Куйбышева

Поступила в редакцию
13/Х 1975

ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Б. Зельдович, А. И. Розловский. Докл. АН СССР, 1947, 57, 365.
2. Х. А. Ракипова, Я. К. Трошин, К. И. Щелкин. ЖТФ, 1947, 17.
3. Я. К. Трошин, К. И. Щелкин. Изв. АН СССР, ОТН, 1955, 9, 100.
4. К. А. Кашкарлы и др. Докл. АН АзССР, 1955, 12, 819.
5. В. П. Карпов. ФГВ, 1965, 1, 3, 68.
6. С. М. Когарко, В. В. Адушкин, А. Г. Лямин. НТПГВ, 1965, 1, 2.
7. Л. А. Гуссак, Е. Н. Спринцина, К. И. Щелкин. ФГВ, 1968, 4, 3, 358.
8. А. Л. Подгребенков, Б. Е. Гельфанд и др. Докл. АН СССР, 1969, 184, 4, 883.
9. Н. П. Дроздов, Я. Б. Зельдович. ЖФХ, 1943, 17, 134.
10. Л. Д. Ландау. ЖЭТФ, 1944, 14, 240.

К АПЕРИОДИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССОВ В РАКЕТНОМ ДВИГАТЕЛЕ НА ТВЕРДОМ ТОПЛИВЕ

*Ю. А. Гостинцев, В. Н. Маршаков, Л. А. Суханов,
П. И. Лебедев*

В [1—3] на основании феноменологической теории нестационарного горения пороха была исследована возможность возникновения аperiodической неустойчивости процесса в ракетном двигателе. Представлялось интересным проверить выводы теории экспериментально. Количественное сопоставление результатов возможно лишь при условии, что все параметры, входящие в теорию, известны. В пределах феноменологической модели нестационарного горения их значения должны определяться из независимых экспериментов или из детальной теории стационарного горения. К сожалению, зависимости температур пламени и поверхности от давления и начальной температуры для порохов в настоящее время изучены не настолько подробно, чтобы их можно было использовать для получения достаточно достоверных значений параметров зоны горения, определяющих устойчивость процесса. Поэтому в общем случае точное количественное сопоставление теории с опытом пока невозможно, и речь может идти лишь о качественном описании того или иного действительного процесса.

Одно из ярких проявлений нестационарного горения пороха в полузамкнутом объеме — самопроизвольное возникновение низкочастотной неустойчивости. О. И. Лейпунский впервые обратил внимание на связь такой неустойчивости с незавершенностью химических реакций (неполнотой выделения энергии) в пламени при низких давлениях В [1—3] это явление объяснено теоретически. Показано, что устойчивость стационарного режима по отношению к малым низкочастотным возмущениям определяется в основном значениями параметров $v = \partial \ln \dot{u} / \partial \ln p$, $s = \partial \ln \dot{T}_F / \partial \ln p$ и $\chi = t_K / t_s$ (\dot{u} , \dot{T}_F , p — скорость горения, температура пламени и давление, t_K и t_s — характерные времена релаксации объема двигателя и прогретого слоя конденсированной фазы пороха). Увеличение v , s и уменьшение χ стабилизирует процесс.

Предсказательную силу теории проиллюстрируем на примере опытов. Исследовалось горение пороха Н в условиях микродвигателей (начальный свободный объем 14 см³, конечный 22,5 см³, площадь критического сечения сопла $\sigma = 3,5 \div 4$ мм²). Заряд — торцевой и конический, так что горение было депрессивным. Характерный вид записи давления во времени представлен на рис. 1 (a — $p = 22$ —40 атм, b — 16—10 атм, β — 5—7 атм, ε — 3—5 атм). Обращает на себя внимание наличие двух областей аperiodической неустойчивости процесса (в областях давлений 5—7 и 3—5 атм), когда двигатель спонтанно переходит с одного устойчивого режима работы на другой.

Наблюдаемое явление можно объяснить на основе полученных в [1, 2] результатов. В самом деле, при депрессивном горении заряда квазистационарно понижающийся уровень среднего давления приводит к постепенному изменению основных параметров двигателя (χ , v , s), определяющих возможность существования режима.

На рис. 2 представлены зависимости $\dot{u}(p)$ (кривая 2) и $\dot{T}_F(p)$ (кривая 1) для пороха Н при $T_0 = 20^\circ\text{C}$, построенные по данным [4, 5]. Величина параметра v меняется от 0,7 при $p > 15$ атм до $v \approx 0,35$ при $p < 10$ атм. Соответствующее изменение s происходит в диапазоне от 0,17 до 0,40. На рис. 3 построены рассчитанные по данным эксперимента и рис. 2 зависимости $\chi(p)$ (кривая 1) и $s(\chi)$ (кривая 2), штриховыми линиями отмечены области наблюдающейся аperiodической неустойчивости, \circ , \bullet , $+$ — первый, второй и третий квазистационарный режим.

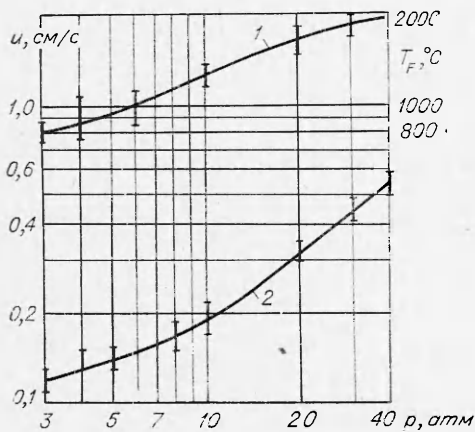


Рис. 2.

На рис. 4 в координатах s , χ приведены теоретические пределы устойчивости стационарных режимов, рассчитанные на основании [1, 2] для $v = 0,70$ и $v = 0,35$ (кривые 2 и 1 соответственно). Область устойчивой работы находится под кривыми; кривая 3 — текущая зависимость $s(\chi)$, взятая из эксперимента для используемого двигателя. Видно, что при $\chi \approx 1$ условие устойчивости в соответствии с теорией нарушается. Однако горение не прекращается, так как с уменьшением давления значение пара-

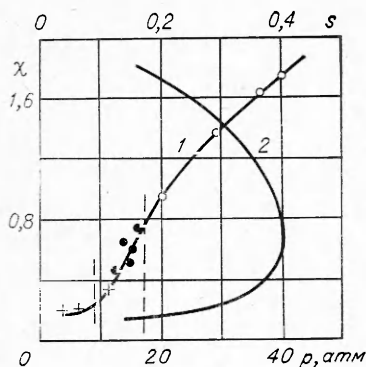


Рис. 3.

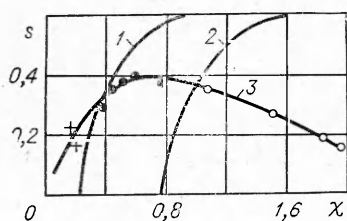


Рис. 4.

метра v у пороха H падает до 0,35 и область устойчивости для данных условий меняется (кривая 1). Это приводит к тому, что в области давлений около 15 атм наблюдается переход работы двигателя с одного режима на другой. При дальнейшем уменьшении среднего давления в камере этот режим также становится неустойчивым и в соответствии с теорией наблюдается еще один аperiодический переход на новый уровень давления.

Принимая во внимание тот факт, что при расчете использовались постоянные величины параметров $k = (\partial \ln \dot{u} / \partial T_0) \times (T_s - T_0) = 1,5$ и $r = (\partial T / \partial T_0) = 0,3$, которые также могут меняться с давлением, полученное совпадение выводов теории с данными экспериментов следует признать удовлетворительным.

Экспериментальные данные настоящей работы находятся в качественном согласии с результатами [6], где была показана возможность перехода с одного стационарного режима работы двигателя на другой с помощью впрыска хладагента в камеру сгорания. Исследования [3, 6] и данной статьи о принципиальной возможности осуществления нескольких стационарных режимов работы РДТТ является новым для внутренней баллистики и требуют дальнейшего изучения.

ИХФ АН СССР,
Москва

Поступила в редакцию
15/VII 1975

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. А. Гостинцев, Л. А. Суханов, П. Ф. Похил. ПМТФ, 1971, 6.
2. Ю. А. Гостинцев, Л. А. Суханов. ФГВ, 1974, 10, 6.
3. В. Н. Вилюнов, А. П. Руднев. ПМТФ, 1972, 6.
4. А. А. Зенин. ФГВ, 1966, 2, 3.
5. А. А. Зенин, О. И. Нефедова. ФГВ, 1967, 3, 1.
6. R. L. Glick, R. E. Askins. Bistable solid propellant Rocket motor. Патент США. РЖ «Авиационные и ракетные двигатели», 1970, № 7, 7. 125П.

О НЕКОТОРЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ ВЛИЯНИЯ СВИНЦОВО-МЕДНЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ НА СКОРОСТЬ ГОРЕНИЯ БАЛЛИСТИЧНОГО ПОРОХА

А. С. Андросов, А. П. Денисюк, Н. П. Токарев

В работах [1—5] исследован механизм действия комбинированных катализаторов, состоящих из различных соединений свинца и меди, при горении порохов и отдельных ВВ. Конкретных же результатов по влиянию этих добавок на скорость горения опубликовано недостаточно. Такие данные необходимы как основа для изучения механизма катализа и