

## ЛИТЕРАТУРА

1. Морз Ф. Колебания и звук. М.—Л., Гостехтеоретиздат, 1949.
2. Blair D. W., Eriksen E., Berge G. K., Acoustic absorption coefficients of combustion gases. AIAA Journal, 1964, No. 2. (Рус. перев. Ракетная техника и космонавтика, 1964, № 3).
3. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. М., Изд-во АН СССР, 1957.
4. Horton M. D., Price E. W., Dynamic characteristics of solid propellant combustion. IX Sympos. (Internat.) on Combustion. Acad. Press., N Y., 1963.
5. Horton M. D. Use of one — dimensional T. Burner to study oscillatory combustion. AIAA Journal, No. 6, 1964. (Рус. перев.: Ракетная техника и космонавтика, 1964, № 6).
6. Coates R. L., Horton M. D., Ryan N. W., T. Burner method of determining the acoustic admittance of burning propellants. AIAA Journal, 1964, No. 6. (Рус. перев.: Ракетная техника и космонавтика, 1964, № 6.)
7. Powell A. Theory of sound propagation through ducts carrying high speed flows, J. Acoust. Soc. America, 1960, No. 2, p. 1640.
8. Meyer E., Mehel F., Kurtze G. Experiments on the influence of flow on sound attenuation in absorbing ducts. J. Acoust. Soc. America, 1958, No. 3, p. 165.
9. Hart R. W., McClure F. T. Combustion instability: interaction with a burning propellant surface. J. Chem. Phys., 1959, vol. 30, p. 1501.
10. Новиков С. С., Рязанцев Ю. С., Акустическая проводимость жесткой горящей поверхности. ПМТФ, 1961, № 6.

О СПИНОВОЙ ДЕТОНАЦИОННОЙ ПРИРОДЕ ТАНГЕНЦИАЛЬНЫХ  
ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ЖРД

О. Ф. Арьков, В. В. Войцеховский, В. В. Митрофанов, М. Е. Топчиян

(Новосибирск)

В настоящее время физическая природа высокочастотной неустойчивости процесса горения (ВЧ) в камерах ЖРД полностью не раскрыта<sup>[1,2]</sup>, и ВЧ продолжает оставаться сложной научно-технической проблемой.

Несомненно, что неустойчивость горения в ЖРД связана с общим принципом Рэлея, состоящим в том, что акустические волны усиливаются, если скорость тепловыделения изменяется в фазе с давлением. Аналогичные явления происходят за фронтом детонационных волн в газах, где экспериментально обнаружено существование различных поперечных волн и теоретически доказана неустойчивость плоского детонационного фронта<sup>[3-5]</sup>.

Интерес к выяснению природы ВЧ связан главным образом с воздействием их на конструкцию двигателя, приводящим к разрушению форсунок и выгоранию стенок камеры сгорания.

Анализ известных к настоящему времени экспериментальных данных по исследованию ВЧ, а также методов искусственного возбуждения их<sup>[6-8]</sup> позволяет прийти к выводу о том, что в основе явления ВЧ лежит возникновение поперечных детонационных волн, во многом подобных наблюдаемым при спиновой детонации.

Отметим здесь несколько основных фактов, связанных с воздействием ВЧ на камеру сгорания и с характером самого явления:

- 1) разрушения локализуются на периферии камеры сгорания вблизи форсуночной головки;
- 2) наблюдаемые разрушения указывают на сильное повышение давления и температуры вблизи форсуночной головки и носят следы направленного воздействия;
- 3) частота основной гармоник колебаний совпадает с частотой тангенциальных акустических колебаний в продуктах сгорания;
- 4) форсирование камеры приводит к повышению частоты ВЧ. Появляющиеся при этом частоты соответствуют более высоким гармоникам указанных колебаний, при этом разрушения захватывают также и ряды форсунок, расположенные ближе к оси камеры;

5) по данным работ [6-8] свечение в волне ВЧ распределено в виде линии, вытянутой вдоль образующей камеры сгорания, с резким повышением интенсивности в прифорсуночной области;

6) боковое ударное инициирование часто приводит к возникновению ВЧ в камерах сгорания, которые в обычных условиях работают устойчиво [6-8].

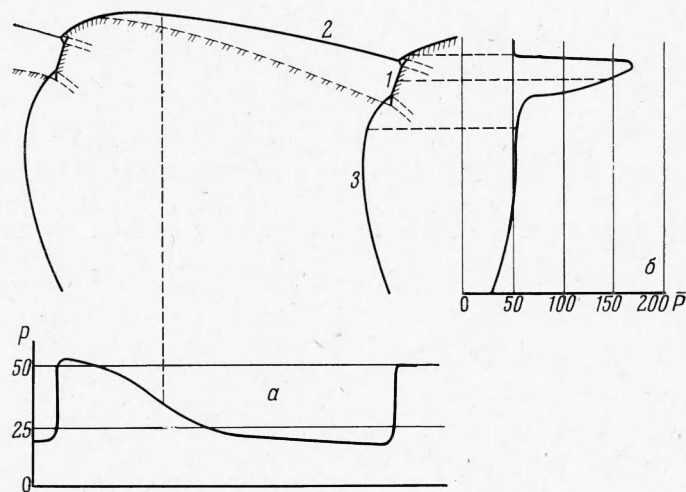
Сравнение этих явлений с наблюдаемыми при спиновой детонации позволяет установить, что они во многом аналогичны.

Известно, что при спиновой детонации существует область очень высоких давлений и температур — поперечная волна, локализованная вблизи стенки детонационной трубки. Частота вращения головы спина совпадает с частотой тангенциальных акустических колебаний [3-4].

Форсирование камеры сгорания любым способом (усилением подачи, распыления и т. п.) соответствует удалению условий от предельных. При газовой детонации в этом случае поперечные волны начинают двигаться через все сечение трубки, а колебания происходят на более высоких гармониках.

При спиновой детонации возникает акустический шлейф, вытянутый вдоль образующей детонационной трубки, наибольшая интенсивность свечения наблюдается вблизи головы спина.

Основное отличие ВЧ от спина состоит в том, что в ЖРД перед поперечной волной нет первичного фронта. Величины давлений, промеренные в камере сгорания на расстояниях от форсунок, примерно соответствующих пологой области спада давления в шлейфе (см. фигуру, б), превышают величину среднего давления в прифорсуночной области, наблюдаемого в отсутствие ВЧ, в два-три раза, в то время как при спине они составляют величину 20—30  $P_0$ .



Однако это отличие только кажущееся. Дело в том, что условия перед поперечной волной при спине и в камере сгорания, обеспечивающие практически мгновенную химическую реакцию за поперечной волной (кривая 1), достигаются различными путями. В первом случае они создаются первичным ударным фронтом ПФ (кривая 2), поднимающим температуру исходной смеси примерно до 1150° К и давление до 20  $P_0$ . Во втором случае эти условия обеспечиваются без предварительного поджата, так как в прифорсуночной области развиваются температуры порядка 1200° К еще при наличии несгоревшей смеси. Таким образом, в ЖРД вблизи форсунок создаются условия такие же, как за передним фронтом при спиновой детонации. Если в последнем случае за исходное брать состояние за первичным фронтом, то давления в рассматриваемой области шлейфа (кривая 3) оказываются такими же, как при ВЧ в ЖРД.

Один из авторов уже указывал ранее [9-11] на возможность реализации процесса, в котором сжигание будет осуществляться поперечными волнами, если подачу газа производить через большое число отверстий, расположенных на плоскости. Можно видеть, что в камерах ЖРД с большим числом форсунок, расположенных на передней стенке, осуществляются как раз такие условия; подогрев исходной смеси, который имеет место в таких камерах, обеспечивает короткие задержки воспламенения уже после однократного сжатия.

На основании приведенных здесь соображений можно сделать вывод, что ВЧ является спиновой детонацией в специфических условиях камеры сгорания ЖРД. Интересно в связи с этим заметить, что для борьбы с возникновением ВЧ ЖРД, разрабатываемые в США (см. таблицу), имеют в прифорсуночной области камеры сгорания специальные гасящие приспособления в виде дефлекторов, перегородок, крестов и т. п.

| Двигатель            | Тяга | Топливо         | Ракета                 |
|----------------------|------|-----------------|------------------------|
| <i>aJ10-138</i>      | 3.6  | $a50 + N_2O_4$  | Титан 3а, III ступень  |
| <i>aJ-137</i>        | 10   | $a50 + N_2O_4$  | Лунный корабль Аполлон |
| $\alpha R105-Na - 5$ | 27   | керосин + $O_2$ | Атлас E, II ступень    |
| $\alpha R91-aJ - 5$  | 45   | $a50 + N_2O_4$  | Титан 2, II ступень    |
| $\alpha R89-Na - 5$  | 75   | керосин + $O_2$ | Атлас E, I ступень     |
| <i>H-1</i>           | 90   | керосин + $O_2$ | Сатурн 1В, I ступень   |
| <i>F-1</i>           | 680  | керосин + $O_2$ | Сатурн 5, I ступень    |

Разработка оптимальных размеров таких перегородок ведется на стендах, оборудованных специальными устройствами, обеспечивающими искусственное возбуждение ВЧ путем введения в камеру сгорания в тангенциальном направлении ударных импульсов [6-8].

Как известно, введение в детонационную трубку радиальных ребер определенной высоты приводит к срыву спиновой детонации. Очевидно, что выбор эффективных средств борьбы с ВЧ и их последствиями должен проводиться с учетом закономерностей, наблюдаемых при газовой детонации, в частности, необходимо принимать во внимание возможность существования зон, в которых ударные давления по крайней мере в 7-8 раз могут превышать среднюю величину их в области форсуночной головки. Это соотношение следует из сравнения величин давления перед и за поперечной волной спиновой детонации.

По-видимому, наиболее радикальным средством является создание камер сгорания, использующих поперечные волны для сжигания топлива. Это может обеспечить более полное выгорание при меньших размерах камеры, поскольку ударные волны будут приводить к дополнительному дроблению капель и сокращению задержек воспламенения.

Поступила 19 XII 1968

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев А. П., Кудрявцев В. М., Кузнецов В. А. и др. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей. М., «Высшая школа», 1967.
2. Зарембо Д. К., Красильников В. А. Введение в нелинейную акустику. М., «Наука», 1966.
3. Войцеховский Б. В., Митрофанов В. В., Топчиян М. Е. Структура фронта детонации в газах. Новосибирск. Изд-во СО АН СССР, 1963.
4. Солоухин Р. И. Ударные волны и детонация в газах. М., Физматгиз, 1963.
5. Денисов Ю. Н., Трошин Я. К., Щелкин К. И. Об аналогии между горением в детонационной волне и в ракетном двигателе. Изв. АН СССР, ОТН, Энергетика и автоматика, 1959, № 6, стр. 79.
6. Detonation and two — phase flow New York — London, Acad. Press, 1962.
7. Hefner R. L., Review of combustion stability. Development with storable propellants. AIAA Paper, № 65-614.
8. Reardon F. H. Combustion stability characteristics of Liquid oxygen Liquid hydrogen at high chamber pressures. AIAA Paper, № 65-612.
9. Войцеховский Б. В. Детонационный спин и стационарная детонация. Сб. Ученого Совета по народнохозяйственному использованию взрыва. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1960, вып. 13.
10. Войцеховский Б. В. Спиновая стационарная детонация. ПМТФ, 1969, № 3.
11. Войцеховский Б. В. Стационарная детонация. Докл. АН СССР, 1959, т. 129, № 6.