

## **Исследование влияния диссипативных свойств конструктивных элементов ракетных двигателей на твердом топливе**

© И.А. Кашина, А.Ф. Сальников

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, 614990, Россия

*Проведен анализ изменения диссипации энергии конструктивных элементов ракетных двигателей на твердом топливе (РДТТ) при условии резонансного или околорезонансного взаимодействия с волновыми процессами газа. Это взаимодействие приводит к усилению амплитуды колебаний газа вследствие перераспределения энергии в конструктивных элементах. Процесс сопровождается изменением внутреннего объема камеры сгорания РДТТ. Увеличивается также амплитуда колебаний давления внутри камеры сгорания РДТТ. Анализ изменения диссипации энергии конструктивных элементов РДТТ необходим для предотвращения отказов двигателя в процессе его эксплуатации.*

**Ключевые слова:** *ракетный двигатель на твердом топливе, продольная акустическая неустойчивость, камера сгорания, коэффициент динамического усиления, диссипация энергии.*

В течение всего периода эксплуатации ракетный двигатель на твердом топливе (РДТТ) испытывает воздействие механических и тепловых нагрузок, различающихся характером нагружения, продолжительностью и интенсивностью. Механические нагрузки определяются давлением внутри камеры; тягой; силами и моментами, действующими со стороны внешней среды и летательного аппарата; массовыми силами и инерционными нагрузками (диссипацией энергии конструктивных элементов РДТТ); вибрациями и др. Тепловые нагрузки обусловлены суточным и сезонным изменением температуры окружающей среды; изменением температуры в технологическом процессе изготовления топливного заряда; кинетическим нагревом в процессе полета ракеты; тепловым ударом при резком изменении температуры внешней среды и др. Большая часть перечисленных механических и тепловых нагрузок, как правило, определяется при разработке общей компоновки ракеты и указывается в техническом задании на разработку двигателя. Серьезную опасность для бортовой аппаратуры и силовых элементов ракеты, а также для элементов конструкции двигателя представляют неустойчивые колебания давления и тяги РДТТ.

На практике могут возникать различные колебательные процессы с изменяющимися во времени частотами и амплитудами. Аналитическая оценка реальных процессов неустойчивых автоколебаний представляет значительную трудность, так как отсутствие полных представлений о механизме возбуждения автоколебаний затрудняет разработку строгих математических моделей. Проблемы вызывают необходимость учета нестационарности многих процессов внутри камеры, изменение объема и геометрии камеры при выгорании заряда, неоднородность продуктов сгорания в объеме камеры, переменность массы заряда, колебания стенок камеры двигателя и т. д. Таким образом, возникает необходимость оценивать и учитывать диссипацию энергии конструктивных элементов РДТТ.

Даже незначительные пульсационные повышения давления у поверхности горения усиливают тепловой поток к поверхности заряда, вызывая увеличение скорости горения, что, в свою очередь, ведет к новому повышению давления и увеличению скорости горения.

Высокочастотная неустойчивость РДТТ проявляется в виде акустических колебаний со значительными, соизмеримыми с уровнем рабочего давления в камере амплитудами и частотами различных мод, появляющимися, исчезающими и возникающими вновь. Часто это сопровождается временным увеличением средней скорости горения топлива. Камера двигателя работает как резонатор, обладающий рядом различных резонансных частот, и потому может реагировать на любые малые возмущения, если приход акустической энергии при виброгорении топлива будет превышать потери этой энергии в камере сгорания [1–3]. Соотношением энергии притока и стока акустической энергии определяется устойчивость работы РДТТ:

$$A = \frac{\sum_{j=1}^n E_j^{\text{пр}}(\tau)}{\sum_{i=1}^n E_j^{\text{ст}}(\tau)},$$

где  $E_j^{\text{пр}}(\tau)$  — приток энергии колебаний;  $E_j^{\text{ст}}(\tau)$  — суммарные потери энергии (стоки энергии). В зависимости от значения соотношения (1) выделяют следующие режимы работы РДТТ:

$A > 1$  — система неустойчива, так как приток возмущающей энергии превосходит ее расход. Этот вид неустойчивости, как правило, связан с процессами горения и устраняется известными методами;

$A = 1$  — система находится в равновесии, т. е. процесс является автоколебательным;

$A < 1$  — система устойчива.

Таким образом, изменяющиеся внутри камеры колебательные процессы могут прерывать неустойчивые режимы на периоды, тем большие, чем сильнее созданный суммарный демпфирующий эффект. Амплитуда установившихся вынужденных колебаний пропорциональна амплитуде вынуждающей силы. При малом затухании эта зависимость имеет очень резкий характер. При заданных возмущающей силе  $F_{\max \text{ возм}}$  и коэффициенте трения  $\beta$  амплитуда  $Y_m$  является функцией только угловой частоты  $\omega$  возмущающей силы.

На рис. 1 показана зависимость  $Y_m$  от  $\omega$  (резонансная кривая). Параметром служит коэффициент затухания  $\delta$ . При  $\omega \approx \omega_0$  амплитуда достигает особенно большого значения (резонанс). При самых малых значениях  $\delta$  амплитуда резко возрастает. Если  $\delta > 0$ , то в случае резонанса  $\omega < \omega_0$ ; величина  $Y_{\max \text{ ст}}$  — статическое отклонение системы под действием постоянной силы  $Y_{\max \text{ возм}}$  ( $\omega = 0$ ).

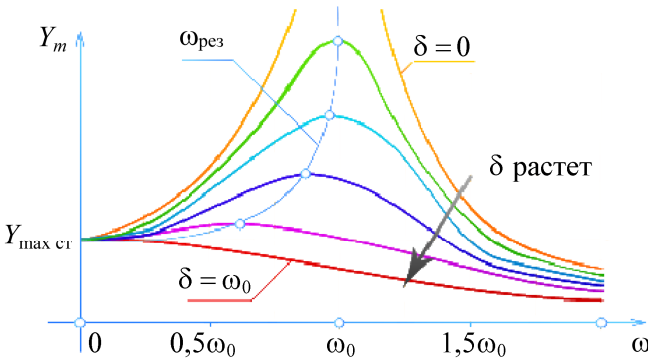


Рис. 1. Резонансная кривая

Проблема уменьшения амплитуды колебаний давления в камере сгорания крупногабаритных РДТТ в настоящее время решена частично. Причинами, приводящими к увеличению амплитуды колебаний давления в камере сгорания, являются резонансное взаимодействие конструктивных элементов РДТТ, диссипация энергии и автоколебания, которые вызывают отказ двигателя в процессе его эксплуатации.

Диссипация на конструктивные элементы РДТТ может изменяться и приводить к нарушению равновесия — увеличению энергии в камере сгорания РДТТ. В свою очередь, это приводит к увеличению амплитуды газа и диссипации конструктивных элементов РДТТ. В то же время вследствие рассеяния энергии на конструктивных элементах РДТТ уменьшается энергия в камере сгорания РДТТ. Этот процесс способствует появлению негативной обратной связи внутри колебательной системы РДТТ (рис. 2).

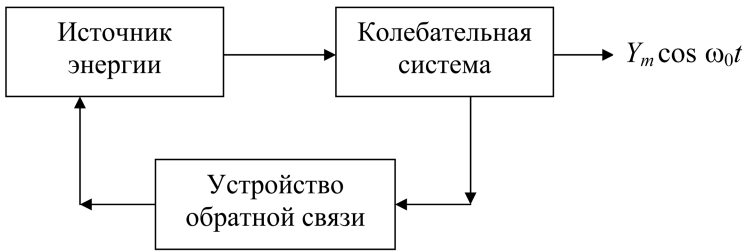


Рис. 2. Функциональная схема автоколебательной системы

Анализ роли стоков энергии показывает, что наибольший уровень стоков наблюдается у сечения сопла, тем не менее уровень поглощения конструктивными элементами доходит до 40 %. Отсюда следует, что баланс изменений в стоках может приводить к изменению амплитуды колебаний давления в камере сгорания РДТТ. На рис. 3 приведены зависимости изменения частоты и амплитуды колебаний конструктивных элементов РДТТ от давления. Характер изменения амплитуды, полученный по модели и эксперименту, достаточно хорошо совпадает. С увеличением статического давления амплитуда резонансных колебаний несколько уменьшается, частота выходит на определенный уровень, который соответствует несущей частоте корпуса, следовательно, по частоте можно определить запас прочности конструкции РДТТ.

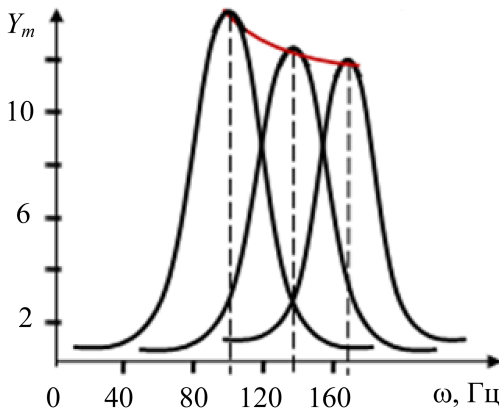
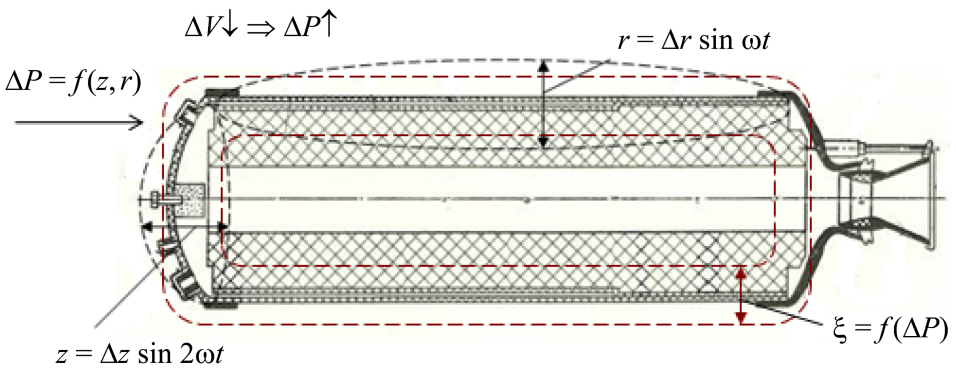


Рис. 3. АЧХ, полученная на основе данных моделирования:  
 $P_1 (40 \text{ МПа}) > P_2 (60 \text{ МПа}) > P_3 (80 \text{ МПа})$

В то же время собственная частота колебаний газа остается постоянной, следовательно, по амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) РДТТ можно определить зоны, где возникает диссипация энергии.

С точки зрения инженерной оценки необходимо провести анализ АЧХ конструктивных элементов РДТТ и степени демпфирования



**Рис. 4.** Схема РДТТ (физическая задача анализа колебаний):

$\Delta z$  и  $\Delta r$  — амплитуды продольных и радиальных колебаний РДТТ;  $\omega$  — собственная частота системы РДТТ;  $\Delta V$  — изменение объема камеры сгорания РДТТ;  $\Delta P$  — изменение давления внутри камеры сгорания РДТТ

этим конструктивными элементами возбуждающего действия газового потока в камере сгорания РДТТ.

Изменение диссипации энергии конструктивных элементов при условии резонансного или околерезонансного взаимодействия с волновыми процессами газа приводит к усилению амплитуды колебаний газа в результате перераспределения энергии в конструктивных элементах, т. е. к увеличению деформационной характеристики (податливости), а следовательно, к росту амплитуды колебаний конструктивных элементов (рис. 4). Таким образом, этот процесс приводит к изменению внутреннего объема камеры сгорания РДТТ и к увеличению амплитуды колебаний давления внутри этой камеры.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Сальников А.Ф., Сальников Д.А., Петрова Е.Н. Исследование условий возбуждения продольных колебаний газа в камере сгорания твердотопливного ракетного двигателя. *Химическая физика и мезоскопия*, 2006, т. 8, № 2, с. 169–176.
- [2] Сальников А.Ф., Петрова Е.Н. Условие возникновения продольной акустической неустойчивости в камере сгорания твердотопливного двигателя. *Внутрикамерные процессы, горение и газовая динамика дисперсных систем. Сб. тр. междунар. конф.*, Санкт-Петербург, 19–23 июня 2006 г. Санкт-Петербург, 2006, т. 1, с. 120–123.
- [3] Сальников А.Ф., Петрова Е.Н., Балуева М.А. Влияние конструктивных элементов камеры сгорания твердотопливного ракетного двигателя на величину амплитуды колебаний давления. *Вестник ПГТУ. Аэрокосмическая техника*, 2006, № 26, с. 16–20.

Статья поступила в редакцию 15.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Кашина И.А., Сальников А.Ф. Исследование влияния диссипативных свойств конструктивных элементов ракетных двигателей на твердом топливе. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 4.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/715.html>

**Кашина Илона Анатольевна** — ассистент преподавателя кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические установки» Пермского национального исследовательского политехнического университета; область научных интересов — исследование условий возбуждения продольных колебаний газа в камере сгорания РДТТ. e-mail: I.Kashina@energос.perm.ru

**Сальников Алексей Федорович** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические установки» Пермского национального исследовательского политехнического университета; область научных интересов — исследование условий возбуждения продольных колебаний газа в камере сгорания РДТТ. e-mail: afsal@pstu.ru