

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИССИПАТИВНЫХ СВОЙСТВ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ВНУТРИБАЛЛИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

И.А. Кашина, А.Ф. Сальников

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Российская Федерация
e-mail: I.Kashina@energosp.perm.ru; afsal@pstu.ru

Проведен анализ изменения диссипации энергии конструктивных элементов ракетного двигателя твердого топлива при условии резонансного или околорезонансного взаимодействия с волновыми процессами газа. Данное взаимодействие приводит к усилению амплитуды колебаний газа вследствие перераспределения энергии в конструктивных элементах. Процесс сопровождается изменением внутреннего объема камеры сгорания ракетного двигателя твердого топлива, также увеличивается амплитуда колебаний давления внутри камеры сгорания. Анализ изменения диссипации энергии конструктивных элементов ракетного двигателя твердого топлива необходим для предотвращения отказов двигателя в процессе его эксплуатации.

Ключевые слова: ракетный двигатель твердого топлива (РДТТ), продольная акустическая неустойчивость, камера сгорания, коэффициент динамического усиления, диссипация энергии.

STUDYING THE IMPACT OF DISSIPATIVE PROPERTIES OF STRUCTURAL MEMBERS ON INTERNAL-BALLISTICS CHARACTERISTICS OF A SOLID-PROPELLANT ROCKET ENGINE

I.A. Kashina, A.F. Sal'nikov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation
e-mail: I.Kashina@energosp.perm.ru; afsal@pstu.ru

A change in energy dissipation of structural members of a solid-propellant rocket engine under condition of the resonant or near-resonant interaction with the gas wave processes is analyzed. This interaction results in the enhancement of the gas oscillation amplitude due to the energy redistribution in structural members. The process is accompanied by the internal volume change of the combustion chamber of the solid-propellant rocket engine; the amplitude of pressure oscillations inside the combustion chamber also increases. To analyze the change in energy dissipation of structural members of the solid-propellant rocket engine is necessary for engine failure prevention during its operation.

Keywords: solid-propellant rocket engine, longitudinal acoustic instability, combustion chamber, dynamic magnification factor, energy dissipation.

В течение всего периода эксплуатации ракетный двигатель твердого топлива (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 на конструктивные элементы РДТТ), вибрациями и т.д. Тепловые нагрузки — суточным и сезонным изменениями 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 т.д. Большая часть перечисленных механических и тепловых нагрузок определяется при разработке общей компоновки ракеты и указывается в техническом задании на разработку двигателя. Большую 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 одновременно с изменяющимися во времени частотами и амплитудами. Аналитическая оценка реальных процессов неустойчивых автоколебаний представляет значительную трудность, так как отсутствие полных знаний о механизме возбуждения автоколебаний затрудняет разработку строгих математических моделей. Определенная трудность заключается в учете нестационарности многих процессов внутри камеры, изменения объема и геометрии камеры при выгорании заряда, неоднородности продуктов сгорания в объеме камеры, переменности массы заряда, колебаний 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 увеличивают тепловой поток к поверхности заряда, вызывая рост скорости горения, что, в свою очередь, снова повышает давление, увеличивая затем скорость горения.

Высокочастотная неустойчивость РДТТ проявляется в виде акустических колебаний со значительными амплитудами и частотами самых различных мод, соизмеримыми с уровнем рабочего давления в камере, появляющимися, исчезающими и возникающими вновь. Это часто сопровождается временным возрастанием средней скорости горения топлива. При этом камера двигателя ведет себя как резонатор, обладающий рядом различных резонансных частот, и потому способна реагировать на любые малые возмущения, если приход акустической энергии при вибрационном горении топлива будет превышать потери этой энергии в камере сгорания [1–3]. Соотношение энергии притока и стока акустической энергии определяет устойчивость работы РДТТ:

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

где $E_j^{\text{пр}}(\tau)$ — приток энергии колебаний; $E_l^{\text{ст}}(\tau)$ — суммарные потери энергии (стоки энергии). Значение данного соотношения приводит к следующим режимам работы РДТТ:

— $A > 1$ — система является неустойчивой, так как приток возмущающей энергии превышает ее расход. Этот вид неустойчивости, как правило, связан с процессами горения и решается 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 больше, 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 $F_{\text{мах.возм}}$ и коэффициенте трения β амплитуда Y_m является функцией только угловой частоты возмущающей силы.

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

Проблема снижения амплитуды колебаний давления в камере сгорания крупногабаритных РДТТ в настоящее время решена частично. Одной из причин, приводящей к увеличению амплитуды колебаний давления в камере сгорания, является резонансное взаимодействие конструктивных элементов РДТТ, диссипация энергии и автоколебания, которые становятся причиной отказа двигателя в процессе его эксплуатации.

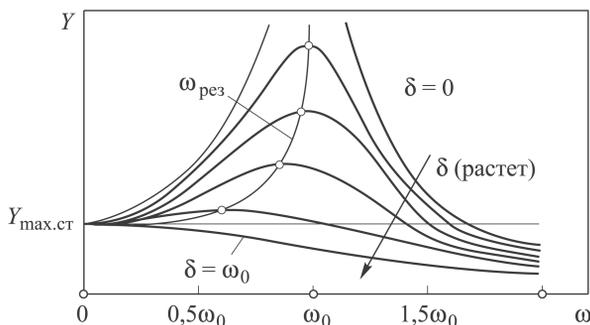


Рис. 1. Резонансная кривая

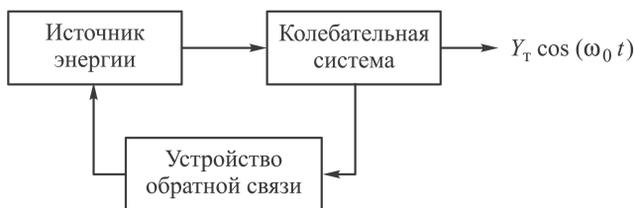


Рис. 2. Функциональная схема автоколебательной системы

Диссипация на конструктивные элементы РДТТ может изменять свое значение, следовательно, это может привести к нарушению равновесия — превышению энергии в камере сгорания РДТТ, что, в свою очередь, приводит к увеличению амплитуды газа и диссипации конструктивных элементов РДТТ. В то же время за счет рассеяния энергии на конструктивных элементах РДТТ происходит уменьшение энергии в камере сгорания РДТТ. Данный процесс способствует появлению негативной обратной связи внутри колебательной системы РДТТ. На рис. 2 представлена схема взаимодействия различных элементов автоколебательной системы.

Анализ роли стоков энергии показывает, что наибольший уровень стоков наблюдается у сечения сопла, тем не менее, уровень поглощения энергии конструктивными элементами может достигать до 40%. Отсюда следует, что баланс изменений в стоках может приводить к изменению амплитуды колебания давления в камере сгорания РДТТ. На рис. 3 приведены изменения частоты и амплитуды колебаний конструктивных элементов РДТТ от давления, из которого следует, что графики изменения амплитуд, полученных в результате моделирования и эксперимента, достаточно хорошо совпадают. Так, с увеличением статического давления амплитуда резонансных колебаний несколько падает, частота выходит на определенный уровень, который соответствует несущей частоте корпуса, следовательно, по частоте можно определить запас прочности конструкции РДТТ.

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 демпфирования этими кон-

$$P_1 (40 \text{ МПа}) > P_2 (60 \text{ МПа}) > P_3 (80 \text{ МПа})$$

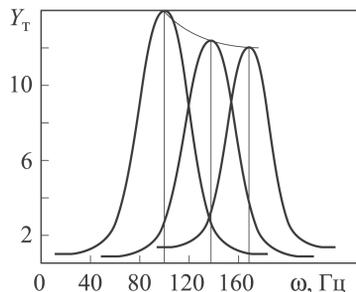


Рис. 3. АЧХ, полученная на основе данных моделирования

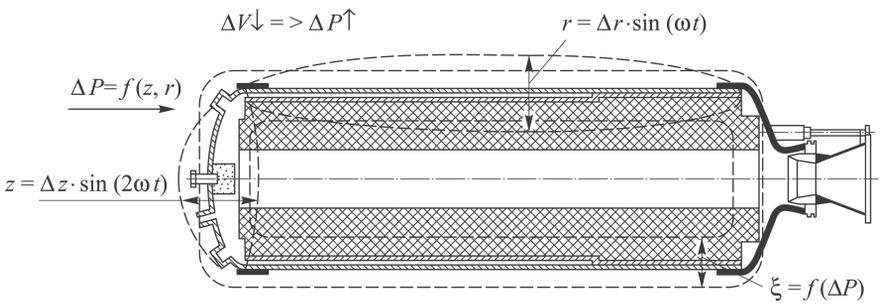


Рис. 4. Схема РДТТ (физическая задача колебаний):

Δz и Δr — амплитуды радиальных и продольных колебаний РДТТ, ω — собственная частота системы РДТТ, ΔV — изменение объема камеры сгорания РДТТ, Δp — изменение давления внутри камеры сгорания РДТТ

структивными элементами возбуждающего действия газового потока в камере сгорания РДТТ.

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

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. трудов междунар. конф., СПб., 19–23 июня 2006 г. СПб., 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. № 2. С. 16–20.

REFERENCES

- [1] Sal'nikov A.F., Sal'nikov D.A., Petrova E.H. The study of the excitation conditions of the longitudinal oscillations in the combustion chamber of a solid rocket engine. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical physics and mesoscopy], 2006, vol. 8, no. 2, pp. 169–17 (in Russ.).

- [2] Sal'nikov A.F., Petrova E.H. The condition of the longitudinal acoustic instability in the combustion chamber of the solid rocket engine. *Sb. trudov mezhdunar. konf. "Vnutrikamernye protsessy, gorenie i gazovaya dinamika dispersnykh system"* [Proc. Int. Conf. "Intrachamber processes, combustion and gas dynamics of disperse systems"], St. Petersburg, 2006, vol. 1, pp. 120–123 (in Russ.).
- [3] Sal'nikov A.F., Petrova E.N., Balueva M.A. Influence of the combustion chamber structural elements of a solid rocket engine on the amplitude value of the pressure oscillations. *Vestnik PGTU "Aerokosmicheskaya tekhnika"* [Herald of the Perm State Tech. Univ. "Airspace engineering"], 2006, no. 2, pp. 16–20 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 9.07.2013

Илона Анатольевна Кашина — ассистент преподавателя кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические установки» Пермского национального исследовательского политехнического университета. Специалист в области исследования условий возбуждения продольных колебаний газа в камере сгорания РДТТ.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Российская Федерация, 614013, Пермь, ул. Академика Королева, д. 15.

I.A. Kashina — assistant lecturer of "Rocket and Space Technology and Power Plants" department of the Perm National Research Polytechnic University. Specializes in the field of investigation of conditions for excitation of gas longitudinal oscillations in the combustion chamber of the solid-propellant rocket engine.

Perm National Research Polytechnic University, ul. Akademika Korolyova 15, Perm, 614013 Russian Federation.

Алексей Федорович Сальников — д-р техн. наук, профессор кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические установки» Пермского национального исследовательского политехнического университета. Автор научных работ в области исследования условий возбуждения продольных колебаний газа в камере сгорания РДТТ.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Российская Федерация, 614013, Пермь, ул. Академика Королева, д. 15.

A.F. Sal'nikov — Dr. Sci. (Eng.), professor of "Rocket and Space Technology and Power Plants" department of the Perm National Research Polytechnic University. Author of publications in the field of investigation of conditions for excitation of gas longitudinal oscillations in the combustion chamber of the solid-propellant rocket engine.

Perm National Research Polytechnic University, ul. Akademika Korolyova 15, Perm, 614013 Russian Federation.