

УДК 621.454.2.052

В.Н. ШНЯКИН, В.А. ШУЛЬГА, Е.В. СТРЕЛЬЧЕНКО

Государственное конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля, Украина

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЯ БЕЗОПАСНОГО ВЫКЛЮЧЕНИЯ ЖРД С ДОЖИГАНИЕМ ОКИСЛИТЕЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗА ПРИ ВЫРАБОТКЕ ОКИСЛИТЕЛЯ

Рассмотрено условие безопасного выключения ЖРД с дожиганием окислительного генераторного газа при выработке окислителя. Представлена методика определения порогового значения сплошности окислителя с учетом времени задержки выключения двигателя.

выключение ЖРД, выработка топлива, сплошность компонента топлива

Известно [1], что энергетические характеристики РН можно улучшить за счет полной выработки компонентов топлива из баков ступени. Выработка компонентов топлива сопровождается ростом количества свободного газа в компоненте и, в конечном счете, приводит к самоостанову ЖРД из-за срыва насосов ТНА. В ЖРД с дожиганием окислительного генераторного газа прекращение поступления окислителя в газогенератор, обусловленное срывом насоса окислителя из-за выработки окислителя, приводит к уменьшению массового соотношения компонентов топлива в газогенераторе и, как следствие, к росту температуры генераторного газа с возгоранием конструкции турбины и газовада [1, 2]. Поэтому при выработке Ок необходимо обеспечить безопасное выключение двигателя.

Рассмотрим интервал времени от момента поступления содержащего свободный газ компонента топлива на вход в насос двигателя до момента срыва насоса из-за уменьшения сплошности компонента топлива. Под понятием «сплошность компонента» будем подразумевать величину, определяемую из выражения:

$$C = \frac{Q_{жс}}{Q_{жс} + Q_2} = \frac{1}{1+q}, \quad (1)$$

где C – сплошность компонента топлива;

$Q_{жс}$ – объемный расход компонента топлива;

Q_2 – объемный расход свободного газа в компоненте;

$q = \frac{Q_2}{Q_{жс}}$ – относительное содержание газа в компоненте.

При выработке компонента топлива из бака сплошность изменяется от 1 до 0. Качественно зависимость сплошности C и давления за насосом P_H от времени показана на рис. 1, где за начало отсчета времени принят момент поступления газосодержащего компонента на вход в двигатель.

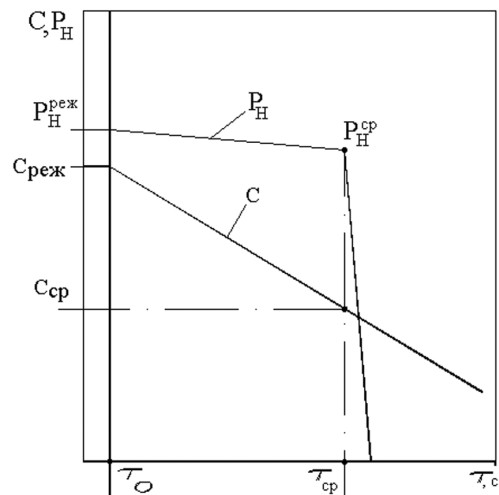


Рис. 1. Характер зависимости давления за насосом и сплошности компонента от времени

Расчеты и опыт показывают [1], что давление за насосом (или его напор) при поступлении газосо-

держашего компонента снижается. Когда плотность компонента достигнет некоторого значения (назовем его «срывным» и обозначим- $C_{ср}$ [3]), происходит срыв насоса с резким снижением расхода компонента. Величина $C_{ср}$ зависит от конструктивных параметров насоса и от типа газа наддува.

При выработке Ок необходимо выключить двигатель до момента времени $\tau_{ср}$, т.е. до срыва насоса Ок ТНА, так как при срыве насоса Ок прогар газового тракта происходит за очень короткое время (не более 0,06 с), т.е:

$$\tau_{выкл} \leq \tau_{ср}, \quad (2)$$

где $\tau_{выкл}$ – момент реализации команды на выключение двигателя.

Выражение (2) представляет собой условие безопасного выключения двигателя при выработке Ок. Согласно (2) формирование команды на выключение двигателя должно быть выполнено заблаговременно, поскольку между формированием и реализацией команды имеется определенный интервал времени, обозначим его как $\Delta\tau_{\Sigma}^*$ и назовем временем задержки выключения двигателя. Тогда моменту формирования команды на выключение будет соответствовать другое значение плотности компонента, назовем его «пороговым», которое можно определить из нижеприведенного соотношения:

$$C_{пор} = C_{ср} - \frac{dC}{dt} \cdot \Delta\tau_{\Sigma}^*. \quad (3)$$

Таким образом, пороговое значение плотности (рис. 2) – это значение плотности, при достижении которого должен быть запущен механизм формирования и исполнения команды на выключение двигателя. При этом выключение должно произойти раньше или одновременно с достижением $C_{ср}$.

Время задержки выключения будет определяться следующими составляющими [1]:

$$\Delta\tau_{\Sigma}^* = \Delta\tau_{сд} + \Delta\tau_{сy} + \Delta\tau_{выкл}, \quad (4)$$

где $\Delta\tau_{сд}$ – инерционность датчика, фиксирующего пороговое значение плотности Ок или пороговое значение контрольного параметра, соответствующего пороговому значению плотности;

$\Delta\tau_{сy}$ – интервал времени между срабатыванием датчика, фиксирующего пороговое значение плотности Ок, и подачей команды на выключение двигателя;

$\Delta\tau_{выкл}$ – интервал времени от момента подачи команды на выключение двигателя до ее реализации- закрытия клапана подачи горючего в газогенератор.

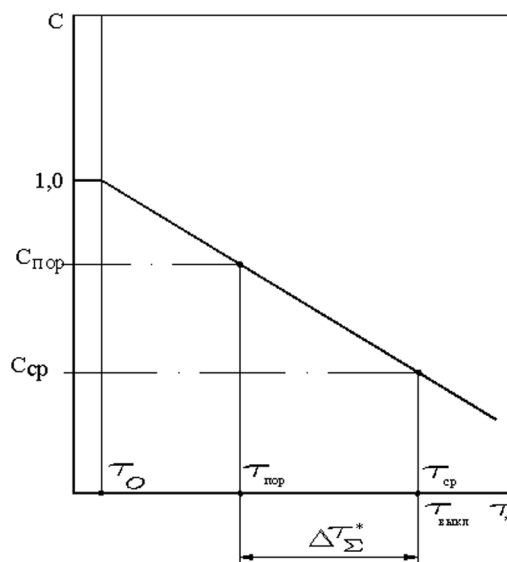


Рис. 2. К определению порогового значения плотности

Анализ составляющих суммарного времени задержки показывает, что все их можно принять в первом приближении как постоянные величины, соответствующие максимальным значениям каждой. Следовательно, время задержки выключения двигателя для каждого конкретного изделия является постоянной величиной, определяемой на основании паспортных данных примененного датчика, логики и быстродействия обработки полученного от датчика сигнала и экспериментальных данных по скорости закрытия клапана, полученных на этапе автономной отработки.

Что касается характера изменения сплошности, то скорость ее изменения будет переменная в зависимости от значений таких величин как давление в баке, перегрузка, колебания свободной поверхности жидкости, а также конструкции заборного устройства. На рис. 3 показаны огибающие прямые возможных значений сплошности.

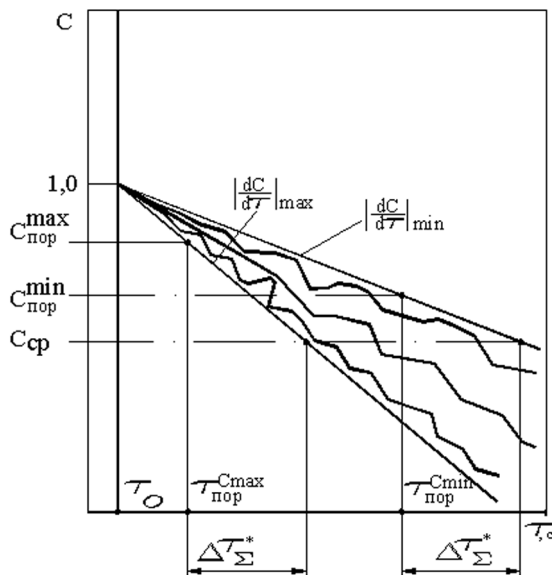


Рис. 3. Огибающие прямые возможных значений сплошности

Очевидно, что безопасное выключение двигателя будет обеспечено, если в качестве порогового значения сплошности принять величину сплошности, соответствующую максимальному модулю скорости ее снижения

$$\left. \frac{dC}{d\tau} \right|_{\max} :$$

$$C_{пор}^{\max} = C_{cp} + \left. \frac{dC}{d\tau} \right|_{\max} \cdot \Delta\tau_{\Sigma}^* \quad (5)$$

Срывное значение сплошности необходимо определить в процессе автономной отработки насосов двигателя. Обычно это делается при снятии срывной характеристики насосов со вдувом свободного газа на вход в насос. Скорость изменения сплошности

при выработке топлива из баков определяется расчетно-экспериментальным путем разработчиками системы питания двигателя компонентами топлива и представляется в виде кривых $C = f(\tau)$, которые являются огибающими всех возможных случаев.

Таким образом, зная зависимость $C = f(\tau)$, экспериментально полученное значение $P_{н} = f(C)$ и время задержки выключения двигателя $\Delta\tau_{\Sigma}^*$ всегда можно определить пороговое значение сплошности $C_{ок}$ или соответствующее ему значение контрольного параметра, по которому будет определен момент выдачи команды на выключение двигателя. При этом будет обеспечено безопасное выключение двигателя.

Литература

1. Development of RD-8 Engine Shutdown at Full propellant depletion from tanks of Zenit-3SL LV Second Stage / Dr. V.A. Shulga, Dr. V.N. Shnjakin, Dr. Ya.N. Ivanov, A.I. Zhivotov, G.P. Petrashko, V.N. Kovalenko, V.I. Timofeev. — 6th International Symposium on Space Propulsion, Versailles, 14 – 17 May, 2002.
2. Павутницкий Ю.В., Мазарченков В.А., Шиленков М.В., Герасимов А.Б. Отечественные ракеты-носители. — С.-Пб.: Изд. Центр СПбГМТУ, 1996. — 178 с.
3. Беляев Е.Н., Чванов В.К., Черваков В.В. Математическое моделирование рабочего процесса жидкостных ракетных двигателей / Под ред. В.К. Чванова. — М: МАИ, 1999. — 228 с.

Поступила в редакцию 3.06.2006

Рецензент: канд. техн. наук, ст. научн. сотр. В.И. Конох, КБ ГКБ «Южное», Днепропетровск.