

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТА АЛГОРИТМИ



Автоколебания внутрикамерной неустойчивости вибрационного горения в ЖРД, обусловленные нестационарностью истечения из реактивного сопла

В.В. ГОЦУЛЕНКО, В.Н. ГОЦУЛЕНКО

Институт предпринимательства “Стратегия”
Днепропетровский государственный технический университет

Определены периодические режимы полной системы уравнений механики газов, представляющие автоколебания вибрационного горения, которые порождаются неустойчивой характеристикой реактивного сопла ЖРД. Иллюстрирован характер их изменения при воздействии механизмов внутрикамерной неустойчивости горения топлива.

Визначено періодичні режими повної системи рівнянь механіки газів, що представляють автоколивання вібраційного горіння, які породжуються нестійкою характеристикою реактивного сопла РРД. Ілюстровано характер їхньої зміни при впливі механізмів внутрікамерної нестійкості горіння палива.

Periodic regimes of the vibrating burning are generated by the unstable characteristic propulsive nozzle, for full systems of the equations of mechanics of gases are determined. Character of their change is illustrated at influence of mechanisms of intrachamber instability of burning of fuel.

Введение. Самовозбуждение вибрационного горения приводит к нарушению нормального функционирования камер сгорания жидкостных реактивных двигателей (ЖРД). При этом происходят колебания тяги, вибрации конструкции ракеты, а также в ряде случаев наблюдается разрушение целостности камер сгорания. Подавление таких колебаний из-за недостаточной изученности явления вибрационного горения согласно [1] требует проведения громадного количества экспериментов на создаваемом ЖРД и его прототипах.

В основу теоретического обоснования неустойчивости горения в ЖРД был положен [2] механизм проявления действия квазиупругой силы феноменологического запаздывания сгорания топлива, который рассматривается во всех монографиях по данной тематике. Однако, релаксационные автоколебания вибрационного горения, возбуждающиеся при значительных аккумулирующих способностях камер сгорания ЖРД или камер горения промышленных агрегатов, от значений величин запаздывания τ не зависят [3]. Преобразование уравнения энергии в напорную характеристику $p_{kc} = F(G)$ камеры сгорания позволило найти ряд других механизмов возбуждения и поддержания автоколебаний вибрационного горения в промышленных агрегатах [3] и ЖРД [4], которые образуют восходящую ветвь зависимости $p_{kc} = F(G)$, и ранее оставались неизвестными. Процессы в камере сгорания ЖРД, а также управление ими влияют на истечение газов из реактивного сопла и определяют его характеристику. При этом порождается внутрикамерная неустойчивость жидкостного реактивного двигателя, связанная с особенностями

истечения, что также способствует возникновению режима вибрационного горения.

Постановка задачи. Массовый расход газа при критическом истечении определяется [5,9] зависимостью:

$$G_c = S_{kp} \cdot \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \cdot \frac{p_c}{v_c}},$$

из которой характеристика сопла может быть определена так:

$$p_c = \frac{c(T_c) \cdot G_c}{\beta(k) \cdot S_{kp}}, \quad (1)$$

где $\beta(k) = k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}$ - расходный комплекс, k - по-

казатель адиабаты, $c(T_c) = \sqrt{kRT_c}$ - скорость звука при температуре потока перед входом его в реактивное сопло, а p_c и v_c соответственно давление и удельный объем. Зависимость $p_c = f\{G, c(T_c)\}$ согласно (1) может иметь различный характер (рис. 1), что определяется изменением температуры как функции от величины давления, а также управляющим воздействием на рабочий процесс в камере сгорания.

При теоретическом описании неустойчивости горения в устройствах с ЖРД характеристика его сопла рассматривалась как монотонно возрастающая функция, например, [1,6]. Поэтому механизм возбуждения автоколебаний вибрационного горения, обусловленный неустойчивым режимом реактивного сопла, для ЖРД оставался не-

известным. Для твердотопливных двигателей в монографии [7] было установлено, что характеристика реактивного сопла при истечении продуктов сгорания пороха может быть монотонно убывающей (рис. 1), что порождает неустойчивость стационарного режима двигателя, которая не связана с преобразованием теплоты сгорания в напор.

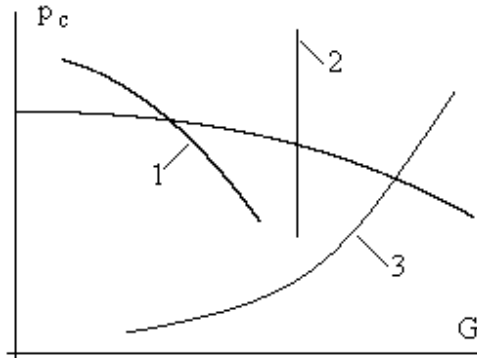


Рис. 1. Характеристика реактивного сопла ЖРД: 1 и 2 – порождающие автоколебания при истечении, 3 – способствующая стабильности потока

Задачей этой работы является математическое моделирование вибрационного горения в ЖРД, обусловленного действием механизма неустойчивости истечения в реактивном сопле, из-за которого образуются зависимости 1 и 2 (рис.1). Также определяется характер изменения таких автоколебаний при проявлении феноменологического запаздывания τ процесса сгорания [1] и механизмов образующих восходящую ветвь напорной характеристики камеры сгорания [4].

Математическая модель рассматриваемой задачи. Нестационарный режим вибрационного горения внутрикамерной неустойчивости ЖРД рассматривается как неустойчивость динамической системы с

сосредоточенными параметрами, которая описывается следующей системой уравнений [4]:

$$\begin{cases} L_{a_{kc}} \frac{dG}{dt} = F(G) - p_c, \\ C_{a_{kc}} \frac{dp_c}{dt} = G(t - \tau) - G_c, \end{cases} \quad (2)$$

где $F(G) = p_{II} + \rho_{kc} R \cdot (T_{kc} - T_{жс}) - h_{\phi}(G) - h_T(G) - h_l(G)$ - напорная характеристика камеры сгорания, которая аппроксимируется полиномом третьей степени и имеет восходящую ветвь при проявлении механизмов внутрикамерной неустойчивости. Составляющие $h_{\phi}(G)$, $h_T(G)$, $h_l(G)$ характеристики $F(G)$ определяют соответственно потери давления: на форсунках, из-за теплоподвода при сгорании топлива и гидравлические потери по длине камеры сгорания, p_{II} - давление подачи топлива, величина $\rho_{kc} R \cdot (T_{kc} - T_{жс})$ составляет изобарное расширение продуктов сгорания, плотность которых ρ_{kc} и R их газовая постоянная, а величина $T_{жс}$ определяет температуру жидкого топлива. Весовой расход $G = G_г + G_{ок}$ состоит из расхода горючего $G_г$ и окислителя $G_{ок}$, а расход газов в закритическом режиме определяется зависимостью (1).

Математическое моделирование автоколебаний, обусловленных нестационарным истечением газов из сопла. Такой режим истечения возникает, если его характеристика $p_c = f\{G, c(T_c)\}$ является убывающей функцией расхода G или если при изменении давления величина расхода остается неизменной. В первом из этих случаев убывающий вид характеристики определяется свойством кривых выгорания, а во втором постоянством отношений давления и температуры в камере сгорания, которое поддерживается автоматически подачей топлива.

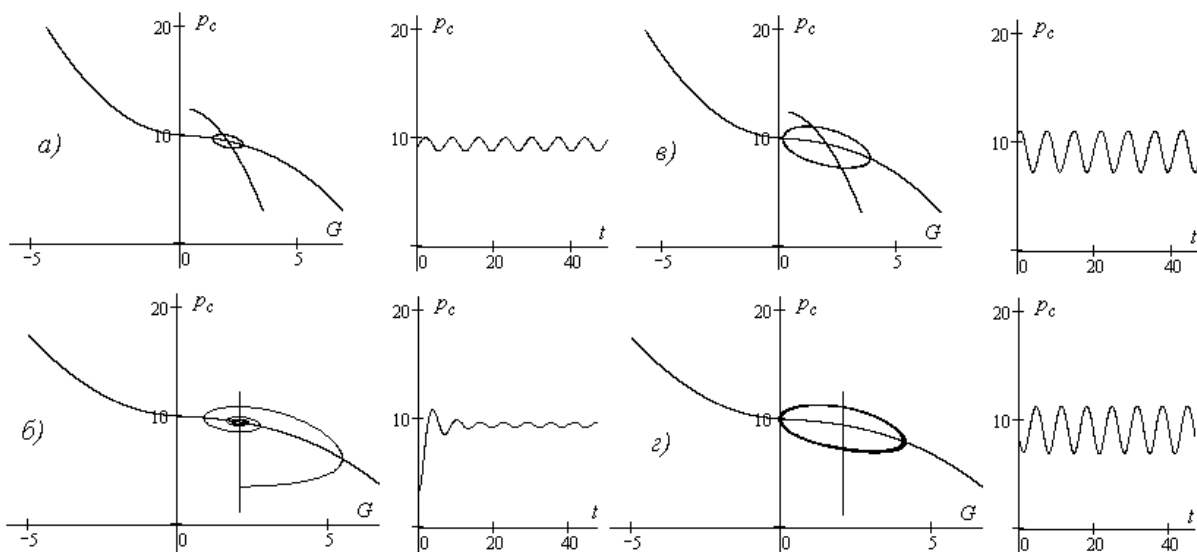


Рис. 2. Автоколебания и соответствующие им предельные циклы, образующиеся при монотонно падающей напорной характеристике $p_c = f\{G, c(T_c)\}$: а) и б) при $\tau = 0$; в) при $\tau = 0,15c$; г) при $\tau = 0,5c$

Автоколебания при характеристиках сопла 1 и 2 (рис. 1) возбуждаются даже при отсутствии восходящей ветви на напорной характеристике камеры сгорания, что иллюстрировано на рисунке 2. Колебания небольших амплитуд (рис. 2 - а, б) могут увеличиться из-за проявления запаздывания τ (рис. 2 - в, г) процесса сгорания топлива, а также из-за уменьшения волнового сопротивления, когда их формы близки к гармоническим.

Далее всюду при построении предельных циклов и разверток колебаний, давление p_c выражалось в МПа, массовый расход G в кг/с, а время t измерялось в секундах.

При образовании восходящей ветви на напорной характеристике $F(G)$ камеры сгорания, амплитуды колебаний вибрационного горения из-за неустойчивой характеристики сопла значительно возрастают (рис. 3).

Следует отметить, что кроме причин указанных в работе [4], образованию восходящей ветви напорной характеристики $F(G)$ способствует и входящая в нее величина $\rho_{kc}R \cdot (T_{kc} - T_{жс})$ при условии возрастающей зависимости $T_{kc} = f(G)$.

Таким образом, из приведенных решений уравнений механики жидкостей или газов при рассмотрении

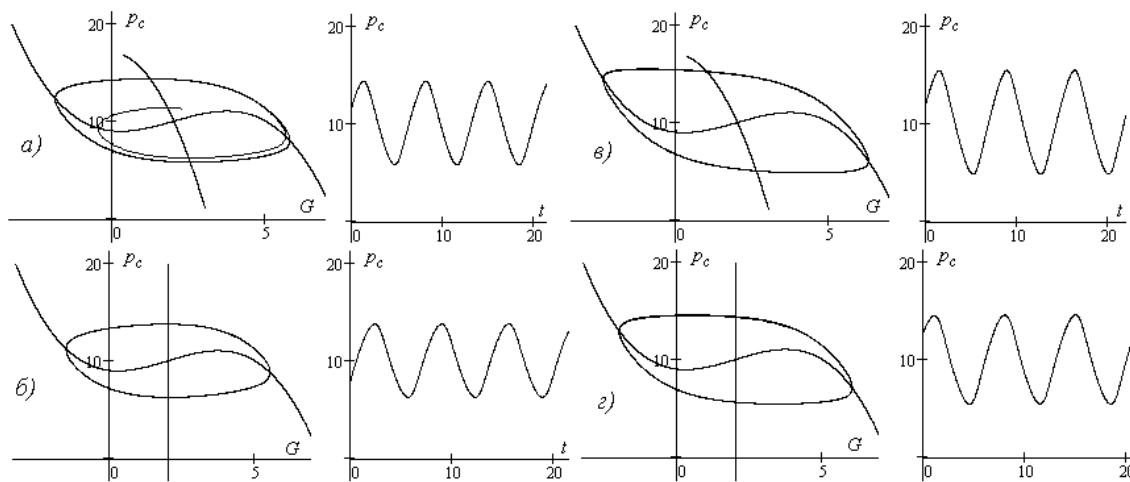


Рис. 3. Автоколебания в камере сгорания ЖРД, когда проявляются механизмы внутрикамерной неустойчивости, а также истечения из сопла: а) и б) при $\tau = 0$; в) и г) при $\tau = 0,3c$

внутрикамерной неустойчивости следует, что автоколебания вибрационного горения возникают из-за механизмов порождающих восходящую ветвь на напорной характеристике $F(G)$, а также при наличии запаздывания сгорания. Кроме того, особенность истечения газов из реактивного сопла, порождающая нисходящую ветвь его характеристики $p_c = f\{G, c(T_c)\}$, также обуславливает внутрикамерную неустойчивость процесса горения.

В тоже время восходящая ветвь напорной характеристики камеры сгорания и нисходящая ветвь ха-

рактеристики сопла в теории неустойчивости ЖРД оставались неизвестными. Причем система уравнений, описывающая неустойчивость горения в ЖРД, рассматривалась вырожденной [1,6], а причина возбуждения автоколебаний сводилась к проявлению действия механизма феноменологического запаздывания τ . В монографии [8] доказано, что автоколебания, описываемые вырожденной системой, являются релаксационными, а необходимым их условием возбуждения является седлообразность характеристики $F(G)$.

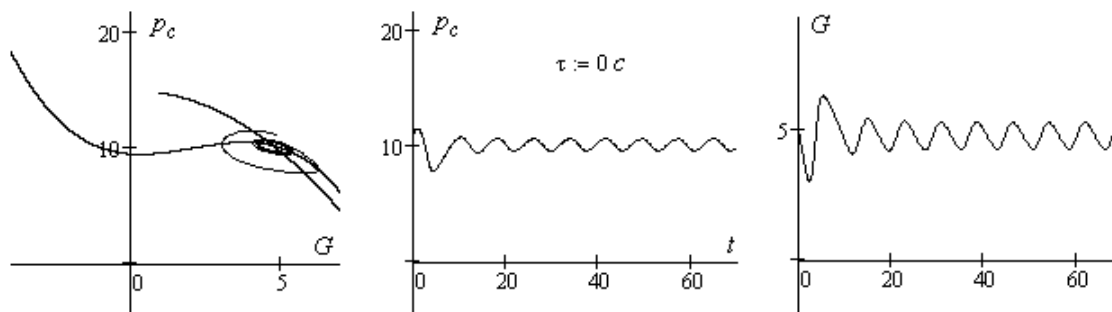


Рис. 4. Автоколебания в камере сгорания, обусловленные неустойчивостью характеристики реактивного сопла

При монотонно падающей зависимости $F(G)$, которая использовалась в вырожденной системе уравнений [1,6], периодических решений не существует. Наличие восходящей ветви на зависимости $F(G)$ порождает ее седлообразный характер из-за присоединения к ней падающей ветви, которая имеется при отрицательных расходах.

Если характеристика реактивного сопла является убывающей функцией, а стационарный рабочий режим расположен также на падающей ветви характеристики $F(G)$, то система уравнений (2) имеет

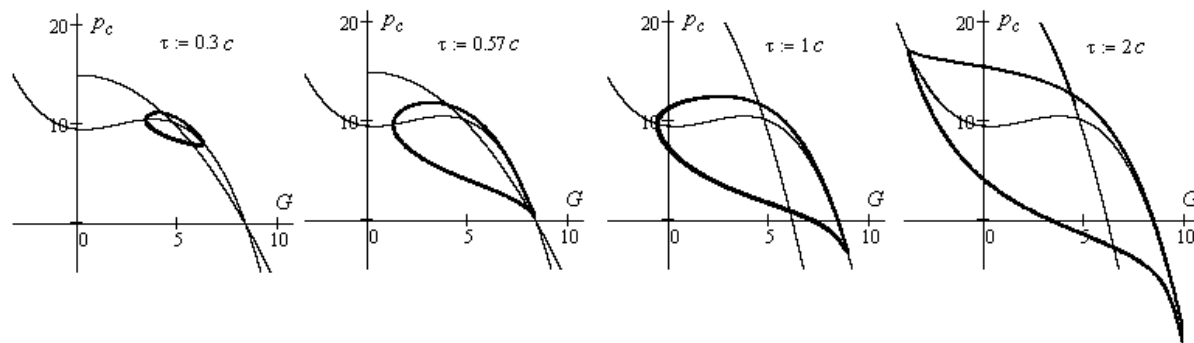


Рис. 5. Возрастание предельного цикла автоколебаний внутрикамерной неустойчивости вибрационного горения с увеличением запаздывания τ сгорания топлива

Таким образом, установившиеся колебания, причиной которых является неустойчивость истечения потока из камеры сгорания, существенно возрастают по амплитуде из-за увеличения запаздывания τ сгорания топлива.

Реальный процесс сгорания является нестационарным и зависит от управления работой двигателя, что приводит к более сложной зависимости $p_c = f\{G, c(T_c)\}$ по сравнению с изображенными на рисунке 1. Поэтому самовозбуждающиеся автоколебания в реальных условиях работы камеры сгорания ЖРД могут несколько отличаться от представленных в статье. Это определяется, главным образом, соответствующими изменениями как характеристики сопла $p_c = f\{G, c(T_c)\}$, так и камеры сгорания.

Выводы

1. Неустойчивый монотонно убывающий вид характеристики реактивного сопла ЖРД $p_c = f\{G, c(T_c)\}$ может быть причиной автоколебаний вибрационного горения в камере сгорания как при устойчивой убывающей по расходу ее напорной характеристике $F(G)$, так и при расположении рабочего режима на нисходящей ее ветви.
2. Амплитуды таких колебаний значительно возрастают с увеличением феноменологического запаздывания τ сгорания топлива.
3. Расположение рабочего режима на восходящей неустойчивой ветви напорной характеристике камеры сгорания способствует увеличению амплитуды автоколебаний из-за увеличения размеров соответствующего им предельного цикла.
4. При условии возрастающей зависимости $T_{kc} = f(G)$ слагаемое $\rho_{kc} R \cdot (T_{kc} - T_{ж})$ напорной характеристи-

ки $F(G)$ также способствует образованию на ней восходящей ветви, что составляет ранее неизвестный механизм вибрационного горения.

Если при этом проявляется механизм феноменологического запаздывания сгорания топлива, то с увеличением значений $\tau \neq 0$ амплитуды колебаний значительно увеличиваются, что определяется соответствующим изменением предельного цикла согласно (рис.5).

ЛИТЕРАТУРА

1. Артамонов К.И. Термогидроакустическая устойчивость. М.: Машиностроение, 1982, 260 с.
2. Лунджи Крокко и Чжен Синь-и. Теория неустойчивости горения в жидкостных ракетных двигателях. - М.: Изд-во иностр. литерат., 1958. - 351 с.
3. Гоцуленко В.В. Математическое моделирование снижения амплитуд колебаний вибрационного горения в крупных промышленных агрегатах // Математическое моделирование, РАН, 2005. Т.17, .- № 11. - С. 16-24.
4. Гоцуленко В.В., Гоцуленко В.Н. Математическое моделирование автоколебаний вибрационного горения в ЖРД, обусловленных тепловыделением сгорания // Математическое моделирование (Днепро-дзержинский государственный технический университет), 2006, № 1,2 (15), С. 44-47.
5. Вукалович М.П., Новиков И.И. Термодинамика. М.: Машиностроение, 1972, 670 с.
6. Натанзон М.С. Неустойчивость горения. - М.: Машиностроение, 1986.-247 с.
7. Зельдович Я.Б., Лейпунский О.И., Либрович В.Б. Теория нестационарного горения пороха. М.: Наука, 1975, 130 с.
8. Мищенко Е.Ф., Розов Н.Х. Дифференциальные уравнения с малым параметром и релаксационные колебания. М.: Наука, 1975, 247 с.
9. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1969, 824 с.