

УДК 629.7:533.6.001

**Б. И. БАСОК, В. В. ГОЦУЛЕНКО***Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев***МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЩЕСИСТЕМНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В ЖРД НА УНИТАРНОМ ТОПЛИВЕ**

*Аналитически определены автоколебания вибрационного горения в модели ЖРД, которые возбуждаются при действии различных механизмов неустойчивости. Установлена особенность изменения автоколебаний вибрационного горения в зависимости от системы подачи жидкого топлива однокомпонентного жидкостного реактивного двигателя. Обоснована возможность снижения амплитуды или полное подавление рассматриваемых колебаний. Теоретическое описание вибрационного горения представлено системой уравнений механики газов, в которой уравнение энергии сведено к напорной характеристике теплоподвода. Это позволило установить ранее неизвестные механизмы этого явления, обусловленные образованием восходящей (неустойчивой) ветви на напорной характеристике теплоподвода, а также получить аналитическое представление для критического времени запаздывания сгорания топлива, определяющего границу области устойчивости.*

**Ключевые слова:** *вибрационное горение, термоакустические автоколебания, напорная характеристика теплоподвода, запаздывание сгорание топлива, тепловое сопротивление, неустойчивость.*

**Введение**

Движение жидкого топлива в тракте жидкостного реактивного двигателя (ЖРД) осуществляется напором, создаваемым насосами или вытеснительной системой его подачи.

Известно, что автоколебания, обусловленные неустойчивой работой лопастного нагнетателя, возбуждаются только при наличии восходящей ветви на его напорной характеристике [1]. Подвод теплоты или других форм энергии к потоку сжимаемой среды также способствует образованию напора или повышению его составляющих в потоке [2-3] из-за частичного превращения подводимой энергии. Изменение располагаемого напора потока происходит и при преодолении гидравлических и других сопротивлений. В этом случае происходит его частичное превращение во внутреннюю энергию, что также отражается на соответствующей напорной характеристике  $F(Q)$  и формирует характер зависимости напора  $F$  от расхода  $Q$  перемещаемой среды.

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 требует проведения громадного количества экспериментов на создаваемом ЖРД и его прототипах.

В основу теоретического обоснования неустойчивости горения в ЖРД был положен механизм проявления действия квазиупругой силы феноменологического запаздывания сгорания топлива, который рассматривается почти во всех монографиях по данной тематике. Согласно работам [2-3] причиной возбуждения автоколебаний при подводе теплоты от электроспирали в трубе Рийке или вибрационного горения в вертикальных камерах сгорания [4] является образование восходящих ветвей на напорных характеристиках соответствующих устройств. В теоретических описаниях неустойчивости горения [5-6] в ЖРД и вибрационного горения в камерах горения промышленных агрегатов [7] механизмы изменения напора потока не реализовывались, т.к. оставались неизвестными.

**Постановка задачи**

В работе [9] рассмотрены различные ранее неизвестные механизмы возбуждения и поддержания внутрикамерной неустойчивости ЖРД, которые порождают восходящую ветвь напорной характеристики. Определены также формы релаксационных автоколебаний постоянной амплитуды вибрационного горения, которые образуются из-за снижения волнового сопротивления. Такие колебания не связаны с процессом сгорания, поскольку наблюдаются и при подводе теплоты от электроспирали [3], т.е. определяются лишь характером теплоподвода.

Задачей данной работы является установление путем математического моделирования изменения

внутрикамерных релаксационных автоколебаний вибрационного горения с приключением к ней системы подачи с лопастным насосом, т.е. при переходе к общесистемной неустойчивости ЖРД, а также разработка способов управления колебаниями в таком режиме.

## 1. Уравнения нестационарного движения в ЖРД

Рассматривается нестационарная совместная работа системы подачи топлива и камеры сгорания, т.е. двигателя в целом, схема которого приведена на рис. 1. Уравнения изменения импульса массы, согласно рассматриваемой схемы ЖРД, определяются действующими силами и инерционностями во всех составляющих его тракта. Эти уравнения, согласно [1], можно записать в форме:

- для подводящей магистрали к насосу:

$$\rho_{ж} \ell_1 \frac{dQ_{ж}}{dt} = (p_e - p_0) S_{п} + G_1 - R_1(Q), \quad (1)$$

- для напорной магистрали:

$$\rho_{ж} \ell_2 \frac{dQ_{ж}}{dt} = (p_n - p_k) S_n + G_2 - R_2(Q), \quad (2)$$

- для камеры сгорания:

$$\rho \ell_{кc} \frac{dQ}{dt} = (p_k - p_c) S_{кc} - R_{\ell}(Q) + G_3 - R_a - R_T(Q) - R_r(Q), \quad (3)$$

в которых  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_3$  - силы тяжести соответственно в подводящей, напорной магистралях и камере сгорания,  $R_1(Q)$ ,  $R_2(Q)$ ,  $R_{\ell}(Q)$  - силы трения в этих же магистралях и  $R_T(Q)$  - сила, обусловленная тепловым сопротивлением [8],  $R_a$  - сила Архимеда,  $R_r(Q)$  - сила сопротивления трения в объеме газообразования камеры сгорания,  $S_{п}$ ,  $S_n$ ,  $S_{кc}$  - площади нормального сечения подводящего, напорного трубопроводов и камеры сгорания.

Уравнение сохранения массы для камеры сгорания примем согласно [8] в виде:

$$C_a \frac{dp_c}{dt} = Q(t - \tau) - \phi(p_c), \quad (4)$$

где  $C_a^{кc} = \frac{V_{кc}}{\rho c^2}$  - акустическая гибкость объема камеры сгорания, а обращение функции  $\phi(p_c)$  [9] составляет гидравлическую характеристику  $h_c(Q)$  сопла Лавала,  $\rho$  - плотность продуктов сгорания,  $c$  - скорость звука в среде камеры сгорания,  $\tau$  - феноменологическое запаздывание сгорания топлива.

Характеристика лопастного насоса в бескавитационном режиме является однозначной функ-

цией расхода:

$$p_n - p_0 = \rho_{ж} g H(Q). \quad (5)$$

Воспользовавшись уравнением неразрывности  $Q_{ж} \rho_{ж} = Q \rho$ , объемный расход жидкого топлива  $Q_{ж}$  выразим через объемный расход  $Q$  продуктов сгорания. Затем, сложив уравнения (1) - (3) с учетом зависимости (5) для напорной характеристики насоса, получим уравнение изменения импульса массы в тракте ЖРД (рис. 1):

$$\left( L_a^п + L_a^{кc} \right) \frac{dQ}{dt} = p_e + \rho_{ж} g H(Q) + \rho_{ж} g (\ell_1 + \ell_2) - (\rho_{ж} - \rho) Z_{кc} g - R(Q) - p_c, \quad (6)$$

где  $L_a^п = \rho Z_{\ell} / S$ ,  $L_a^{кc} = \rho Z_{кc} / S_{кc}$ ,  $Z_{кc}$  - длина камеры сгорания,  $R(Q) = R_1(Q) + R_2(Q) + R_{\ell}(Q)$ .

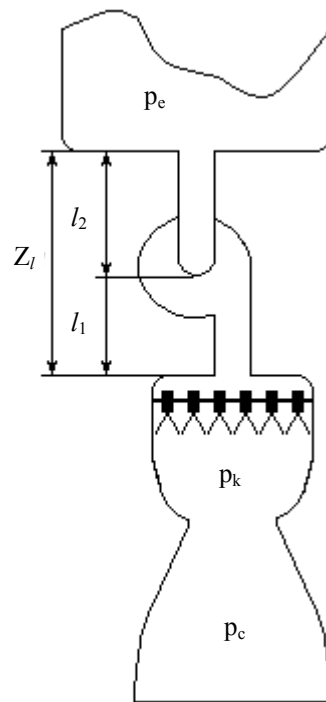


Рис. 1. Схема однокомпонентного ЖРД с насосной подачей топлива

Тогда общесистемные нестационарные движения топлива и продуктов сгорания в ЖРД описываются следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{L_a^п + L_a^{кc}}{\rho_{ж} g} \frac{dQ}{dt} = F_{п}(Q) - A(Q) - h_{\ell}(Q) - h_T(Q), \\ \rho_{ж} g C_a^{кc} \frac{d}{dt} \left( \frac{p_c}{\rho_{ж} g} \right) = Q(t - \tau) - \phi \left( \frac{p_c}{\rho_{ж} g} \right), \end{cases} \quad (7)$$

где:  $h_{\ell}(Q)$  - гидравлические потери в тракте ЖРД,

$A(Q) = (\rho_{ж} - \rho) g Z_{кc}$ ,  $F_{п}(Q) = \frac{p_e}{\rho_{ж} g} + H(Q) + \ell_1 + \ell_2$  -

напорная характеристика системы подачи,  $h_T(Q)$  - тепловые потери напора [8], обусловленные подво-

дом теплоты, выраженные в метрах столба перемещаемой среды.

## 2. Математическое моделирование автоколебаний при общесистемной неустойчивости

Для удобства построения периодических автоколебательных решений системы (7) запишем ее в более компактной форме:

$$L \frac{dQ}{dt} = F(Q) - p, \quad C \frac{dp}{dt} = Q(t - \tau) - \varphi(p), \quad (8)$$

где:  $F(Q) = F_n(Q) - A(Q) - h_\ell(Q) - h_\tau(Q)$  - напорная характеристика теплоподвода,  $L = L_{ag}^n + L_{ag}^{kc}$ ,

$$L_{ag}^n = \frac{L_a^n}{\rho_{жg}}, \quad L_{ag}^{kc} = \frac{L_a^{kc}}{\rho_{жg}}, \quad C = \rho_{жg} C_a^{kc}, \quad p = \frac{p_c}{\rho_{жg}}.$$

При  $\tau = 0$  и отсутствии в схеме ЖРД системы подачи с лопастным нагнетателем, т.е. при вытеснительной подаче топлива, в которой  $L_{ag}^n = 0$ , периодическое решение системы (8) [9] представляет релаксационные колебания  $p(t)$  (рис.2), амплитуда которых не изменяется при проявлении механизма феноменологического запаздывания  $\tau$  сгорания

топлива. Такие автоколебания значительных амплитуд определяются только теплоподводом изменяющим напорную характеристику  $F(Q)$ . С повышением акустической массы  $L_{ag}^n$  подводящей магистрали релаксационные автоколебания преобразуются в гармонические (рис. 2), которые с дальнейшим ростом  $L_{ag}^n$  уменьшаются по амплитуде и исчезают. Переход релаксационных колебаний в гармонические (рис. 2) позволяет осуществить их динамическое демпфирование, несмотря на то, что амплитуды таких колебаний существенно увеличиваются с ростом запаздывания сгорания топлива  $\tau$  (рис. 3). Гармонические автоколебания являются наиболее легко управляемыми [4].

Таким образом, с повышением акустической массы  $L_{ag}^n$  системы подачи ЖРД форма автоколебаний вибрационного горения преобразуется от релаксационной к близкой и гармонической форме. При этом амплитуда колебаний вначале увеличивается (рис. 2), а затем колебания становятся гармоническими, амплитуды которых уменьшаются. Из-за проявления механизма неустойчивости Л. Крокко [5-6] феноменологического запаздывания  $\tau$  сгорания топлива, амплитуда гармонических колебаний вновь существенно возрастает (рис. 3).

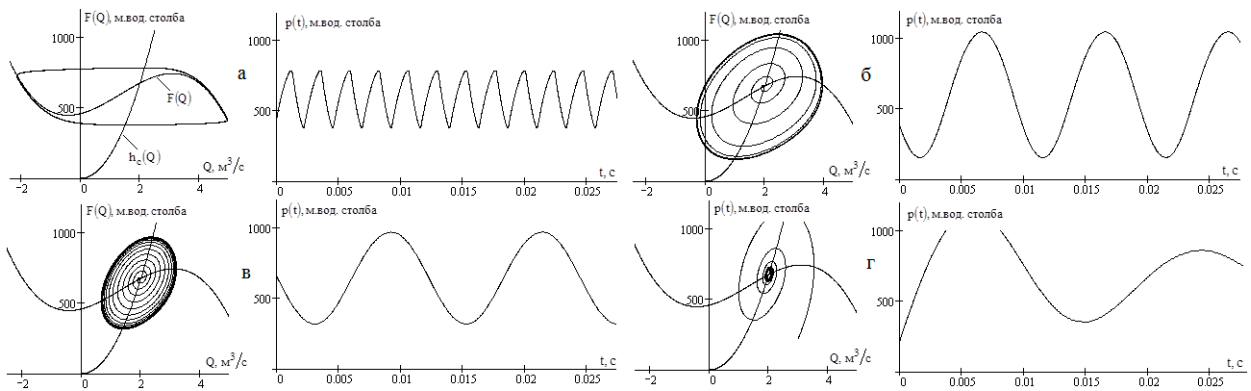


Рис. 2. Предельные циклы и формы автоколебаний вибрационного горения при общесистемной неустойчивости при варьировании  $L_{ag}^n, \frac{c^2}{m^2}$ : а) 0; б) 0.3; в) 0.45; г) 1

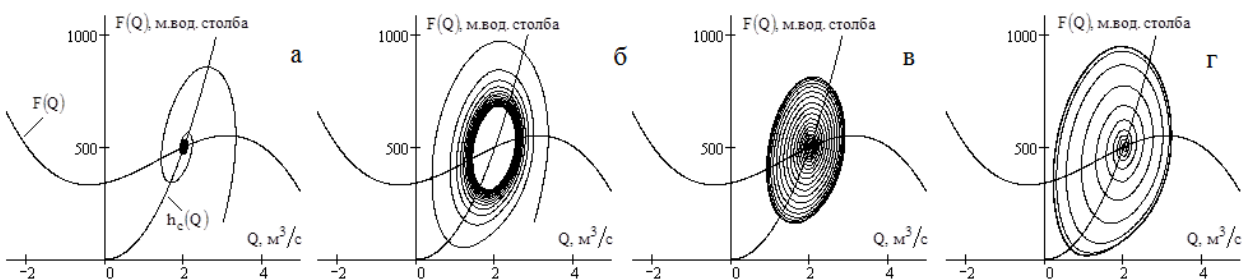


Рис. 3. Увеличение предельного цикла колебаний вибрационного горения с ростом  $\tau$  запаздывания сгорания топлива  $\tau, c$ : а) 0; б) 0,00155; в) 0,00017; г) 0,002

Амплитуды гармонических колебаний можно также уменьшить повышением волнового сопротивления колебательного контура [8], увеличивая при этом акустические массы, как подводятся магистрали, что было выше иллюстрировано, так и камеры сгорания.

### 3. Расчет границы области устойчивости

Параметры стационарного режима течения продуктов сгорания определяются из системы дифференциально – разностных уравнений (8), полагая в ней  $\frac{dQ}{dt} = 0$  и  $\frac{dp}{dt} = 0$ .

Воспользовавшись разложением Тейлора

$$Q(t - \tau) = Q(t) - \tau \frac{dQ}{dt} + O(\tau^2),$$

система (8), с точностью до величин порядка  $O(\tau^2)$ , запишется в следующей форме:

$$\begin{cases} L \frac{dQ}{dt} = F(Q) - p, \\ C \frac{dp}{dt} = Q - \frac{\tau}{L} (F(Q) - p) - \varphi(p). \end{cases} \quad (9)$$

Далее более удобно перейти к безразмерным переменным:

$$x = \frac{Q - \xi}{\xi}, \quad y = \frac{p - \eta}{\eta}, \quad \eta = F(\xi). \quad (10)$$

В переменных (10) система уравнений (9) запишется в следующем виде:

$$\xi L \frac{dx}{dt} = F(\xi + \xi x) - \eta(y + 1), \quad (11)$$

$$\eta C \frac{dy}{dt} = (x + 1)\xi - \tau \left( \frac{F(\xi + \xi x) - \eta(y + 1)}{L} \right) - \xi(y + 1)^{1/2}.$$

Таким образом, характер устойчивости стационарного режима течения продуктов сгорания, окончательно сводится к исследованию устойчивости нулевого положения равновесия динамической системы (11). Согласно первому методу Ляпунова исследования устойчивости рассмотрим матрицу Якоби системы (11), вычисленной в ее нулевом положении равновесия.

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \frac{dF(Q)}{dQ} \Big|_{Q=\xi} & -\frac{\eta}{\xi L} \\ \frac{\xi}{\eta C} \left( 1 - \frac{\tau}{L} \frac{dF(Q)}{dQ} \Big|_{Q=\xi} \right) & \frac{1}{C} \left( \frac{\tau}{L} - \frac{1}{2} \frac{\xi}{\eta} \right) \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Для определения критического времени запаздывания сгорания топлива  $\tau_{кр}$  необходимо предварительно вычислить корни характеристического уравнения:

$$\det(\mathbf{J} - \lambda \mathbf{E}) = 0. \quad (13)$$

Раскрывая определитель (13), получаем

$$\lambda_{1,2} = \frac{\text{tr}(\mathbf{J}) \pm i \sqrt{4 \det(\mathbf{J}) - \text{tr}^2(\mathbf{J})}}{2},$$

где  $\text{tr}(\mathbf{J})$  и  $\det(\mathbf{J})$  соответственно след, и определитель матрицы Якоби  $\mathbf{J}$ . Причем, согласно (12), получаются следующие представления для данных характеристик:

$$\text{tr}(\mathbf{J}) = \frac{1}{L} \frac{dF(Q)}{dQ} \Big|_{Q=\xi} + \frac{1}{C} \left( \frac{\tau}{L} - \frac{1}{2} \frac{\xi}{\eta} \right),$$

$$\det(\mathbf{J}) = \frac{1}{LC} \frac{dF(Q)}{dQ} \Big|_{Q=\xi} \left( \frac{\tau}{L} - \frac{1}{2} \frac{\xi}{\eta} \right) + \frac{1}{LC} \left( 1 - \tau \frac{dF(Q)}{dQ} \Big|_{Q=\xi} \right).$$

Таким образом, критическое время запаздывания сгорания топлива определяется из условия:

$$\text{Re}\{\lambda_{1,2}\} = 0 \Leftrightarrow \text{tr}(\mathbf{J}) = 0 \Leftrightarrow$$

$$\frac{1}{L} \frac{dF(Q)}{dQ} \Big|_{Q=\xi} + \frac{1}{C} \left( \frac{\tau_{кр}}{L} - \frac{1}{2} \frac{\xi}{\eta} \right) = 0,$$

откуда окончательно получаем, что

$$\tau_{кр} = \frac{1}{2} \frac{\xi L}{F(\xi)} - C \frac{dF(Q)}{dQ} \Big|_{Q=\xi}. \quad (14)$$

Следовательно, стационарный режим течения продуктов сгорания является устойчивым при выполнении неравенства  $\tau < \tau_{кр}$ . Соответственно при выполнении противоположного неравенства стационарный режим является неустойчивым и даже бесконечно малые его возмущения приводят к самовозбуждению автоколебаний.

### 4. Способы снижения амплитуды колебаний вибрационного горения в ЖРД

Ввиду сложности и малой изученности вибрационного горения [10] как борьба с ним, так и его реализация в соответствующих установках осуществляется мало эффективно. Введение напорной характеристики, определяющей изменение напора потока из-за выделения теплоты сгорания, и представленное выше теоретическое описание нестационарного движения с использованием напорной характеристики  $F(Q)$ , позволяет найти решение задачи снижения амплитуды колебаний вибрационного горения и оценить эффективность используемых при этом способов.

Для этого воспользуемся уравнением интегральных кривых

$$\frac{dp}{dQ} = \frac{Q(t - \tau) - \varphi(p)}{F(Q) - p} \frac{L}{C} \quad (15)$$

системы уравнений (8). Согласно известной теоремы А.А. Андропова динамическая система (8)

имеет периодическое автоколебательное решение, тогда и только тогда, когда соответствующее уравнение интегральных кривых (15) имеет предельный цикл, размер которого определяет амплитуду автоколебаний. Исходя из этого, следует, что управление рассматриваемыми автоколебаниями можно реализовать путем деформации соответствующего им предельного цикла. Практически это реализуется различными способами [8] нейтрализации восходящей ветви напорной характеристики теплоподвода  $F(Q)$ , а также изменением волнового сопротивления  $Z = \sqrt{L_a/C_a}$ , что отчасти иллюстрировано на рис. 2 при изменении акустической массы  $L_{ар}^{\Pi}$  подводящей магистрали.

Волновое сопротивление камеры сгорания  $Z_{кc}$  на практике увеличивают путем введения в нее антиимпульсных перегородок [6], которые как препятствуют возникновению радиальных колебаний, так и за счет уменьшения сечений образовавшихся каналов снижают амплитуду продольных колебаний [8] из-за увеличения при этом значений  $Z_{кc}$ .

Следует отметить, что для уменьшения радиальных пульсаций применяют резонатор Гельмгольца [6], но при этом амплитуды продольных колебаний не могут демпфироваться, т.к. оси камеры сгорания и резонатора взаимно перпендикулярны [8]. В [9] теоретически обоснована возможность снижения амплитуды продольных автоколебаний вибрационного горения применением антиимпульсных перегородок, а также при присоединении к камере сгорания резонатора Гельмгольца.

## Заключение

Приключению к камере сгорания системы подачи с лопастным нагнетателем за счет повышения волнового сопротивления, которое становится общесистемным, либо преобразует релаксационные внутрикамерные автоколебания в гармонические, либо осуществляет их полное подавление. Амплитуды гармонических колебаний существенно возрастают с увеличением запаздывания сгорания топлива, но снижение их амплитуды является более простым, например, установкой разделительных (антиимпульсных) перегородок в камере сгорания [6], динамическим демпфированием [9] и др. Снижение амплитуды релаксационных колебаний возможно либо устранением восходящей (неустойчивой) ветви на напорной характеристике теплоподвода, либо преобразованием их в гармонические, которые являются более управляемыми.

## Литература

1. Казакевич, В. В. Автоколебания (помпаж) в компрессорах [Текст] / В. В. Казакевич. – М. : Машиностроение, 1974. – 264 с.
2. Basok, B. I. Self-oscillations in a Rijke's tube with receiver positioning at its input [Text] / B. I. Basok, V. V. Gotsulenko // *Thermophysics and Aeromechanics*. – 2014. – Vol. 21, No. 4. – P. 487–496.
3. Basok, B. I. Calculating the Parameters of Self - Oscillations in the Vertical Combustion Chamber of the Blast - Furnace Air Heater during Unstable Combustion combustion [Text] / B. I. Basok, V. V. Gotsulenko // *Thermal Engineering*. – 2015, Vol. 62, No. 1. – P. 58–63.
4. Basok, B. I. Mathematical modeling of self - oscillations in the combustion chamber of liquid rocket engine with variable latency combustion [Text] / B. I. Basok, V. V. Gotsulenko // *Physics Journal*. – 2015. – Vol. 1, No 3. – P. 343 – 348.
5. Устойчивость рабочего процесса в двигателях летательных аппаратов [Текст] / М. А. Ильченко, В. В. Крютченко, Ю. С. Мнацаканян и др. – М. : Машиностроение, 1995. – 320 с.
6. Наманзон, М. С. Неустойчивость горения [Текст] / М. С. Наманзон. – М. : Машиностроение, 1986. – 248 с.
7. Доменные воздухонагреватели [Текст] / Ф. Р. Шкляр, В. М. Малкин, С. П. Кашианова и др. – М. : Металлургия, 1982. – 176 с.
8. Басок, Б. И. Термогидродинамическая неустойчивость потока теплоносителя [Текст] / Б. И. Басок, В. В. Гоцуленко. – К. : ТОВ ВД "КАЛИТА", 2015. – 412 с.
9. Basok, B. I. Concerning the problem of dynamic damping of the vibration combustion self-oscillations in a liquid-propellant rocket engine [Text] / B. I. Basok, V. V. Gotsulenko, V. N. Gotsulenko // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2012. – Vol. 85, No. 6. – P. 1346 – 1351.
10. Ларинов, В. М. Автоколебания газа в установках с горением [Текст] / В. М. Ларинов, Р. Г. Зарипов. – К. : Изд-во казан. гос. техн. ун-та, 2003. – 327 с.

## References

1. Kazakevich, V. V. *Avtokolebaniya (pompazh) v kompressorax* [Self-oscillations (surge) in compressors]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974. 264 p.
2. Basok, B. I., Gotsulenko, V. V. Self-oscillations in a Rijke's tube with receiver positioning at its input. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2014, vol. 21, no. 4. pp. 487 – 496.
3. Basok, B. I., Gotsulenko, V. V. Calculating the Parameters of Self - Oscillations in the Vertical Combustion Chamber of the Blast - Furnace Air Heater during Unstable Combustion combustion. *Thermal Engineering*, 2015, vol. 62, no. 1, pp. 58–63.

4. Basok, B. I., Gotsulenko, V. V. Mathematical modeling of self - oscillations in the combustion chamber of liquid rocket engine with variable latency combustion. *Physics Journal*, 2015, vol. 1, no. 3, pp. 343 – 348.

5. Ilchenko, M. A., Kryutchenko, V. V., Mnacakanyan, U. S. i dr. *Ustojchivost rabocheho processa v dvigatelyax letatelnyx apparatov* [The stability of working process in aircraft engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1995. 320 p.

6. Natanzon, M. S. *Neustojchivost gorenija* [The instability of the burning]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 248 p.

7. Shklyar, T. R., Malkin, V. M., Kashtanova, S. P. i dr. *Domennye vozduxonagrevateli* [Blast heaters]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1982. 176 p.

8. Basok, B. I., Gotsulenko, V. V. *Termogidrodinamicheskaya neustojchivost potoka teplonositelja* [Thermohydrodynamic instability of coolant flow]. Kiev, "KALITA" Publ., 2015. 412 p.

9. Basok, B. I., Gotsulenko, V. V., Gotsulenko, V. N. Concerning the problem of dynamic damping of the vibration combustion self-oscillations in a liquid-propellant rocket engine. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2012, vol. 85, no. 6, pp. 1346 – 1351.

10. Larinov, V. M., Zaripov, R. G. *Avtokolebaniya gaza v ustanovkax s gorenijem* [Self-oscillations of gas in installations with combustion]. Kiev, Kazan. Gos. texn. un-t Publ., 2003. 327 p.

*Поступила в редакцию 11.04.2016, рассмотрена на редколлегии 12.05.2016*

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАГАЛЬНОСИСТЕМНОЇ НЕСТІЙКОСТІ В РРД НА УНІТАРНОМУ ПАЛИВІ

*Б. І. Басок, В. В. Гоцуленко*

Аналітично визначено автоколивання вібраційного горіння в моделі РРД, які збуджуються при дії різних механізмів нестійкості. Встановлена особливість зміни автоколивань вібраційного горіння в залежності від системи подачі рідкого палива однокомпонентного рідинного реактивного двигуна. Обґрунтовано можливість зниження амплітуди або повну нейтралізацію розглянутих коливань. Теоретично опис вібраційного горіння представлено системою рівнянь механіки газів, в якій рівняння енергії зведено до напірної характеристики теплопотоку. Це дозволило встановити раніше невідомі механізми цього явища, обумовлені утворенням висхідної (нестійкої) гілки на напірній характеристиці теплопотоку, а також отримати аналітичне подання для критичного часу запізнення згорання палива, що визначає границю області стійкості.

**Ключові слова:** вібраційне горіння, термоакустичні автоколивання, напірна характеристика теплопотоку, запізнення згорання палива, тепловий опір, нестійкість.

## MATHEMATICAL MODELING OF WIDE INSTABILITY IN ROCKET ENGINE ON THE MONOFUEL

*B. I. Basok, V. V. Gotsulenko*

Analytically determined self-oscillations of vibration combustion in LRE models, which are excited under the action of different mechanisms of instability. Installed feature changes to self-oscillations of vibration combustion, depending on the system liquid fuel supply of single-component liquid propellant rocket engine. The possibility of decrease of amplitude or complete suppression of the considered oscillations. Theoretical description of vibrational combustion is represented by the system of equations of mechanics of gases, in which the energy equation is reduced to the pressure characteristics of the heat supply. This allowed to identify previously unknown mechanisms of this phenomenon, due to the formation of a rising (unstable) branches of the pressure characteristic of the heat supply, and also obtain an analytic representation for the critical time lag of combustion, which defines the boundary of the stability domain.

**Key words:** vibration combustion, thermoacoustic self - oscillations, the pressure characteristic of the heat, the delay of the fuel combustion, thermal resistance, instability.

**Басок Борис Іванович** – д-р техн. наук, проф., чл.- корр. НАНУ, зам. директора по науковій роботі інститута технічної теплофізики НАН України, Київ, e-mail: basok@ittf.kiev.ua.

**Гоцуленко Володимир Володимирович** – д-р техн. наук, ведучий науковий співробітник відділу теплофізических основ енергосберегаючих теплотехнологій інститута технічної теплофізики НАН України, Київ, e-mail: gosul@ukr.net.

**Basok Boris Ivanovich** – doctor of technical Sciences, Professor, corresponding member of NAS of Ukraine, Deputy Director of the Institute of Engineering Thermal Physics of NAS of Ukraine.

**Gotsulenko Vladimir Vladimirovich** – doctor of technical Sciences, senior researcher of the Department of thermophysical fundamentals of energy-saving technologies of the Institute of Engineering Thermal Physics of NAS of Ukraine.