

УДК 629.7: 533.6.001

**В.В. ГОЦУЛЕНКО***Институт предпринимательства “Стратегия”, Желтые воды, Украина***ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ АВТОКОЛЕБАНИЙ ВИБРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ В МОДЕЛИ ЖИДКОСТНОГО РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ**

*Аналитически определены автоколебания вибрационного горения в модели ЖРД, которые возбуждаются при действии различных механизмов. Обосновано снижение их амплитуды или полное подавление таких колебаний. Теоретическое описание вибрационного горения представлено полной системой уравнений механики газов, в которой уравнение энергии сведено к напорной характеристике теплоподвода, определяющей преобразование его в напор потока. Это позволило установить ранее неизвестные механизмы этого явления, обусловленные образованием восходящей ветви на соответствующей характеристике, а также получить решения этой системы и, кроме того, вырожденной системы с запаздыванием, которая ранее рассмотрена в теории ЖРД.*

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

**Введение**

Теоретическое описание неустойчивости горения в жидкостных реактивных двигателях (ЖРД) с сосредоточенными параметрами осуществляется вырожденной системой уравнений [1 – 2]. Ее периодическое решение, представляющее релаксационные автоколебания, образуется при наличии в ней седлообразной характеристики [3]. В то же время причины образования возрастающей по расходу ветви зависимости давления в камере сгорания ЖРД оставались неизвестными. Введение Л. Крокко феноменологического запаздывания  $\tau$  процесса горения позволило [4] осуществить анализ его неустойчивости, обусловленной соответствующим механизмом.

Математическим моделированием [5] были определены закономерности автоколебаний вибрационного горения, самовозбуждающихся из-за запаздывания  $\tau$ , и установлены возможности управления величиной их амплитуды.

При экспериментальных исследованиях, направленных на определение возможности снижения амплитуды колебаний, которая значительно возрастает с повышением тепловой нагрузки вертикальных камер горения воздухонагревателей доменных печей, обнаружилось [6], что одни и те же мероприятия на разных агрегатах могут вызывать различный, а иногда и прямо противоположный эффект. Это подтверждает, что кроме известного механизма возбуждения и поддержания колебаний наличием  $\tau$  запаздывания сгорания, проявляется дей-

ствие, по крайней мере, еще одного механизма вибрационного горения, порождающего периодическое решение системы уравнений движения.

Образование восходящей ветви напорной характеристики колебательного контура, возникающей из-за теплоподвода, составляющее одну из причин феномена Рийке [7], также является и неизвестным ранее вторым механизмом вибрационного горения [8].

Автоколебания, самовозбуждающиеся из-за его проявления, имеют характер помпажа [9]. Одна из особенностей таких колебаний [10] заключается в снижении их амплитуды при повышении волнового сопротивления камеры горения. Автоколебания, обусловленные феноменологическим запаздыванием, при таких же условиях по амплитуде возрастают [5], т.е. изменяются диаметрально противоположно.

В группе Кармана [4] была высказана возможность образования энтропийных волн в камере сгорания ЖРД, из-за которых истечение из реактивного сопла становится нестационарным, но практическая реализация этого третьего механизма возникновения периодических решений оставалась неизвестной. Нисходящая ветвь характеристики сопла твердотопливного реактивного двигателя [11], обуславливающая неустойчивость истечения [2], как раз и составляет причину образования энтропийных волн. При образовании такой характеристики сопла автоколебания самовозбуждаются и в отсутствии в камере сгорания других механизмов неустойчивости движения, а также в таких условиях происходит возрастание амплитуды возбуждающихся колебаний независимо от их природы [12].

### Постановка задачи

Цель этой работы заключается в определении периодического решения невырожденной системы уравнений движения в камере сгорания ЖРД, когда проявляются одновременно рассмотренные выше механизмы его образования, а также в обосновании снижения амплитуды автоколебаний вибрационного горения.

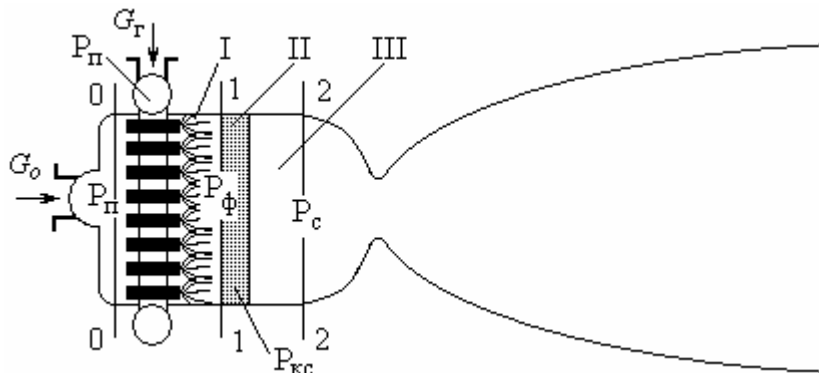


Рис. 1. Модель камеры сгорания ЖРД

Изменение импульса массы (количества движения) между сечениями 0-0 и 2-2 в рассматриваемой модели может быть записано в форме [9]:

$$L_{a.k.c.} \frac{dG}{dt} = p_{II} - h_{\phi} - h_{\ell} - h_T - p_c, \quad (1)$$

где  $L_{a.k.c.} = \frac{\ell}{S}$ ;  $S$  – площадь нормального сечения камеры сгорания,  $h_{\phi}$  – потери давления при распыливании топлива;  $h_{\ell}$  – гидравлические потери по длине камеры сгорания;  $h_T$  – потери давления возникающие из-за теплоподвода.

Уравнение баланса массы с учетом феноменологического запаздывания  $\tau$  сгорания топлива [2]:

$$C_{a.k.c.} \frac{dp_c}{dt} = G(t - \tau) - G_c, \quad (2)$$

где  $C_{a.k.c.} = \frac{V_{k.c.}}{c^2}$  – акустическая гибкость емкости камеры сгорания;  $V_{k.c.}$  – ее объем;  $c$  – скорость звука в потоке газа;  $G_c$  – массовый расход газа через сопло.

Таким образом, система уравнений (1) – (2) может быть представлена

$$\begin{cases} L_{a.k.c.} \frac{dG}{dt} = F(G) - p_c; \\ C_{a.k.c.} \frac{dp_c}{dt} = G(t - \tau) - G_c, \end{cases} \quad (3)$$

в которой

$$F(G) = F_{\text{подачи}}(G) - h_{\phi}(G) - h_{\ell}(G) - h_T(G) - p_c,$$

### 1. Результаты работы

#### 1.1. Уравнения движения внутрикамерной неустойчивости горения в модели ЖРД

Схема рассматриваемой модели ЖРД представлена на рис. 1.

$p_{II} = F_{\text{подачи}}(G)$  – напорная характеристика параллельного включения лопастных насосов окислителя и горючего.

#### 1.2. Характеристика теплового сопротивления $h_T(G)$

В работе [13] из уравнения энергии в виде первого закона термодинамики для потока воздуха, к которому подводится теплота, было получено следующее выражение для теплового сопротивления  $\Delta h_T$ :

$$\Delta h_T = \frac{w_1^2}{2} - \frac{w_2^2}{2}. \quad (4)$$

Используя (4) и уравнение сплошности  $\rho_1 w_1 = \rho_2 w_2$  для канала с постоянной площадью сечения и соотношения между параметрами изобарного процесса  $\frac{T_1}{T_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}$ , определим потери давления  $h_T = \rho_1 \Delta h_T$  в таком виде:

$$h_T = \frac{\rho_1 w_1^2}{2} \left[ 1 - \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^2 \right]. \quad (5)$$

Зависимость  $h_T(G)$  представляет собой при изобарном теплоподводе отрицательную монотонно убывающую функцию, которая способствует образованию восходящей ветви напорной характеристики  $F(G)$ .

Тепловое сопротивление в камере сгорания ЖРД определим воспользовавшись тем, что при отсутствии теплопотерь теплосодержание топлива равно теплосодержанию продуктов сгорания, т.е.  $i_T = i_{T_{к.с.}}$  [14].

Тогда из уравнения энергии для камеры сгорания (рис. 1) для сечений 1-1 и 2-2 получается равенство

$$i_1 + \frac{w_1^2}{2} = i_2 + \frac{w_2^2}{2} + \Delta h_T \quad (6)$$

Поскольку  $i_1 = i_T$ , а  $i_2 = i_{T_{к.с.}}$ , то из уравнения (6) следует, что  $h_T(G)$  может быть определена зависимостью (5), которая способствует образованию восходящей ветви характеристики  $F(G)$ .

### 1.3. Характеристика реактивного сопла и совместность его работы с камерой сгорания

Максимальный массовый расход газа  $G$  в критическом сечении сопла

$$G = f_{\min} \sqrt{k \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \frac{p_c}{v_c}}$$

может быть также определен

$$G = f_{\min} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \frac{p_c}{\sqrt{kRT_c}},$$

откуда его характеристика  $p_c = h_c(G, T_c)$  представляется в следующем виде:

$$p_c = \frac{c(T_c)G}{\beta(k) \cdot f_{\min}}, \quad (7)$$

где  $\beta(k) = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}$  и  $c(T_c)$  – скорость звука при температуре истекающего газа.

Из условия совместной работы камеры сгорания и реактивного сопла  $F(G^*) = h_c(G^*, T_c^*)$  определяются параметры стационарного режима обозначенного звездочкой, через которые характеристика сопла может быть записана как

$$p_c = A \sqrt{T_c} G_c, \quad (8)$$

где  $A = G^* \frac{p_c^*}{\sqrt{T_c^*}}$ .

При изменении расхода  $G$  в зависимости от давления в камере сгорания происходит и измене-

ние соотношения компонентов, так как характеристики насосов имеют различные интенсивности изменения напора по расходу.

В зависимости от изменения коэффициента избытка окислителя определяется и температура [14] в камере сгорания.

Используя такую зависимость, расчет которой приведен в [14] для топлива керосин и азотная кислота, была построена характеристика  $h_c(G, T_c)$ .

Совмещение характеристики сопла  $h_c(G, T_c)$  с напорной характеристикой  $F(G)$  камеры сгорания рассматриваемой модели ЖРД определяет два возможных стационарных режима (рис. 2, б, в, д, е), возникающих при одном и том же давлении в камере сгорания на левой и правой ветвях зависимости  $h_c(G, T_c)$ .

### 1.4. Особенность поведения динамической системы при известных механизмах возбуждения автоколебаний вибрационного горения

На рис. 2 изображены предельные циклы системы уравнений (3) при последовательном увеличении числа механизмов, способствующих неустойчивости стационарного режима, что обеспечивает возрастание амплитуды колебаний (на рис. 2, а, б, в показаны предельные циклы релаксационных автоколебаний, а на рис. 2, г, д, е соответственно представлены предельные циклы автоколебаний близких к гармоническим).

Автоколебания вибрационного горения  $p_c(t)$ , образовавшиеся при совместном действии рассмотренных выше механизмов их поддержания, представлены с соответствующими им предельными циклами (рис. 2, в, е) на рис. 3, а, в. Иллюстрировано также преобразование рассматриваемых автоколебаний  $p_c(t)$  в релаксационные неизменной амплитуды (рис. 3, б, г).

Предельные циклы таких колебаний не деформируются при дальнейшем увеличении акустической гибкости  $C_{а.к.с.}$ , а также при величинах запаздывания  $\tau \leq 0,001$  с (рис. 3, б) и  $\tau \leq 0,0001$  с (рис. 3, е).

Особенностью представленных решений является образование единого предельного цикла для двух стационарных близко расположенных режимов. Кроме того, наблюдается значительное возрастание амплитуды колебаний при небольшом увеличении значений  $\tau$  запаздывания.

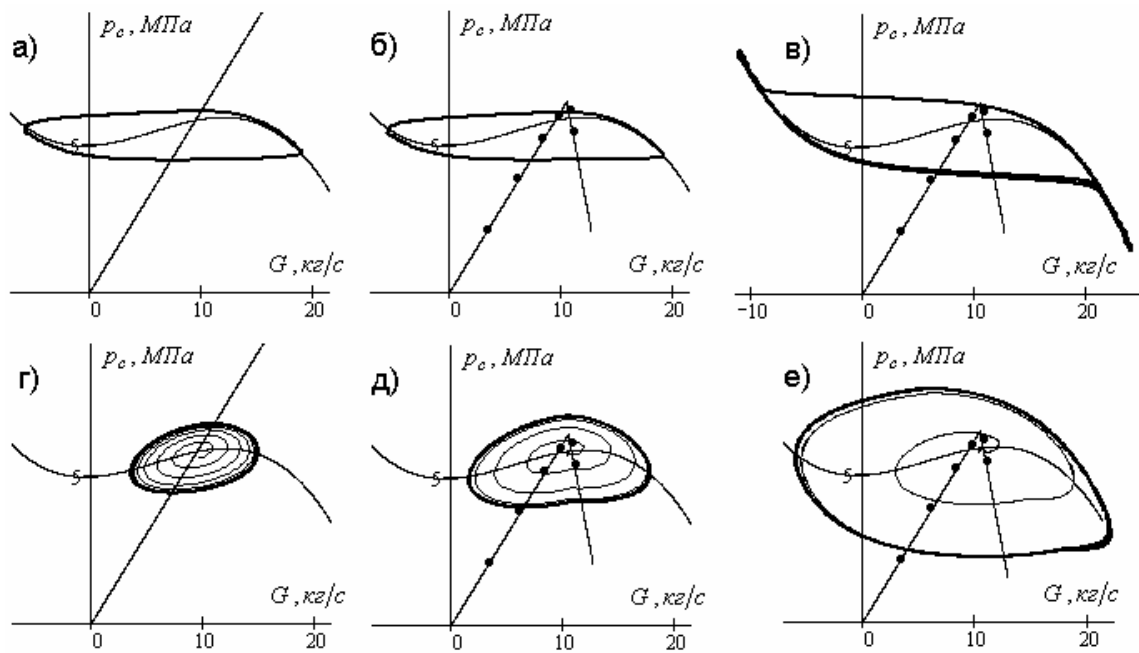


Рис. 2. Предельные циклы и их деформация механизмами вибрационного горения:  
а, б, г, д –  $\tau = 0$ ; в –  $\tau = 0,001$  с; е –  $\tau = 0,0001$  с

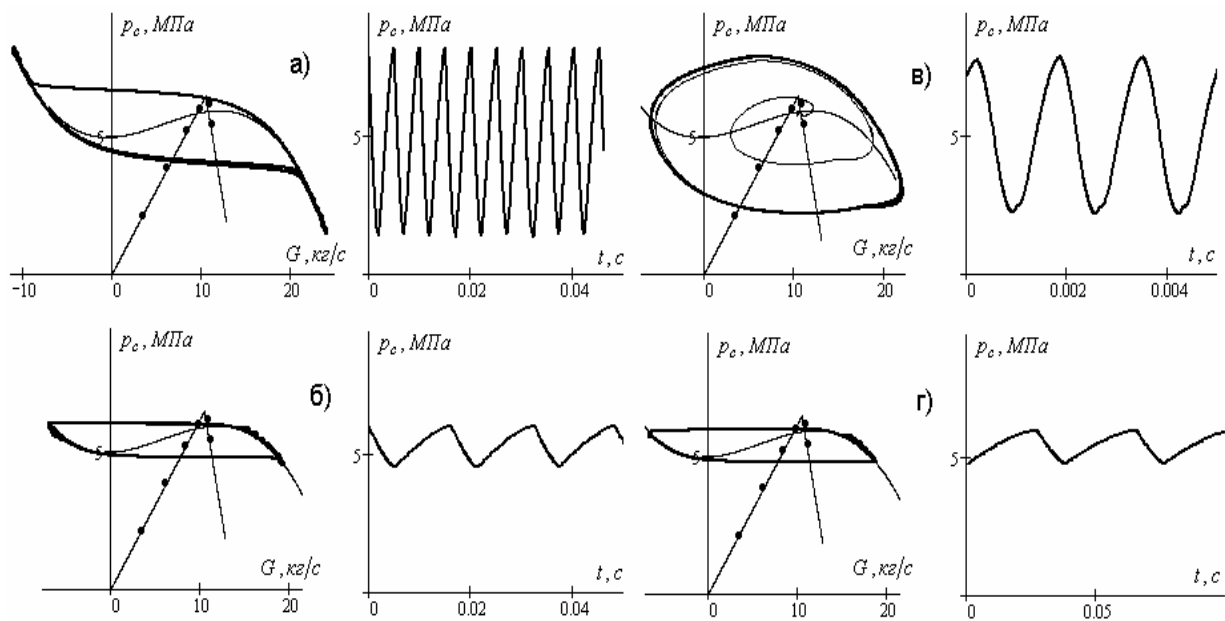


Рис. 3. Преобразование предельных циклов путем повышения акустической гибкости  $C_{a.k.c.}$  :

- а –  $\tau = 0,001$  с,  $C_{a.k.c.} = 4,271 \cdot 10^{-9}$  м·с ; б –  $\tau = 0,001$  с,  $C_{a.k.c.} = 4,271 \cdot 10^{-8}$  м·с ;  
в –  $\tau = 0,0001$  с,  $C_{a.k.c.} = 1,068 \cdot 10^{-9}$  м·с ; г –  $\tau = 0,0001$  с,  $C_{a.k.c.} = 1,068 \cdot 10^{-7}$  м·с ;

При отсутствии восходящей ветви на характеристике  $F(G)$  наличие феноменологического запаздывания  $\tau$  сгорания топлива также способствует образованию предельного цикла, который увеличивается с ростом значений  $\tau$  [5].

### 1.5. Снижение амплитуды колебаний вибрационного горения в ЖРД и их полное подавление

Наиболее просто это осуществляется, когда на напорной характеристике  $F(G)$  отсутствует восхо-

дующая ветвь, что реализуется путем снижения величины волнового сопротивления  $Z = \sqrt{L_a/C_a}$ . При этом достигается исчезновение предельных циклов и происходит стабилизация нестационарного режима [5], обусловленного механизмом феноменологического запаздывания сгорания. Поскольку волновое сопротивление можно представить как  $Z = c(T_c)/S$ , то его понижение в тракте камеры сгорания исходя из этого достигается за счет уменьшения площади сечения  $S$  камеры сгорания стабилизаторами перегородками [3], а также наряду с этим увеличением акустической гибкости  $C_{a,c}$  собственно камеры сгорания или присоединением к ней стабилизирующего объема. Интенсивность протекания процессов в камере сгорания, перед зоной горения определяет упругость макрообъемов порождающих акустическую гибкость  $C_{a,c}$  в целом, что также можно использовать при ее варьировании.

Предельный цикл, возникший при некотором запаздывании  $\tau^*$  и преобразующийся с увеличением  $C_{a,c}$  в независимый от  $\forall \tau < \tau^*$ , при значениях феноменологического запаздывания  $\tau > \tau^*$  возрастает за счет присоединения к нему ветвей характеристики  $F(G)$ . Амплитуды колебаний  $p_c(t)$  становятся зависимыми от  $\tau$ , т.е. вновь проявляется действие механизма Л. Крокко.

При отсутствии запаздывания ( $\tau = 0$ ) или нейтрализации его действия обеспечение устойчивости рабочего режима горения осуществляется устранением причины образования восходящей ветви характеристики  $F(G)$ , из-за которой образуется предельный цикл. Поскольку ее образование связано с характером монотонности зависимости  $h_T(G)$ , то ослабить интенсивность восходящей ветви  $F(G)$  возможно путем повышения возрастающего по расходу сопротивления в камере сгорания, что может быть достигнуто увеличением вихревых потерь [10] при распыле топлива.

### Заключение

1. Получены периодические решения, представляющие изменения давления в камере сгорания, когда автоколебания поддерживаются механизмами неустойчивого, возрастающего по расходу подвода напора к потоку, нестационарностью истечения, способствующей образованию энтропийных волн, а также наличием феноменологического запаздывания сгорания.

2. При близко расположенных стационарных режимах образуется единый предельный цикл при параметрах в рассматриваемой модели соответствующих реальным, приведенным в литературе по ЖРД.

3. Обоснованы способы снижения амплитуды продольных автоколебаний вибрационного горения в модели ЖРД или их полное подавление.

### Литература

1. Раушенбах Б.В. Вибрационное горение / Б.В. Раушенбах. – М.: Физматгиз, 1961. – 500 с.
2. Натанзон М.С. Неустойчивость горения / М.С. Натанзон. – М.: Машиностроение, 1986. – 247 с.
3. Мищенко Е.Ф. Дифференциальные уравнения с малым параметром и релаксационные колебания / Е.Ф. Мищенко, Н.Х. Розов. – М.: Наука, 1975. – 247 с.
4. Крокко Л. Теория неустойчивости горения в жидкостных ракетных двигателях / Л. Крокко, Чжен Синь-и. – М.: Изд-во иностр. литературы, 1958. – 351 с.
5. Гоцуленко В.В. Автоколебания вибрационного горения в ЖРД, самовозбуждающиеся из-за феноменологического запаздывания сгорания топлива, и их математическое моделирование / В.В. Гоцуленко, В.Н. Гоцуленко // Математическое моделирование (Днепродзер. гос. ун-т). – 2008. – № 1 (18). – С. 39-42.
6. Доменные воздушнонагреватели: моногр. / Ф.Р. Шкляр, В.М. Малкин, С.П. Каишанова, Я.П. Калугин, В.П. Советкин. – М.: Металлургия, 1982. – 176 с.
7. Gotsulenko V.V. Special Modes of the Pijke Phenomenon / V.V. Gotsulenko // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2005. – Vol. 78, Number 2. – P. 375-379.
8. Гоцуленко В.В. Математическое моделирование снижения амплитуд колебаний вибрационного горения в крупных промышленных агрегатах / В.В. Гоцуленко // Математическое моделирование, РАН. – 2005. – Т.17, № 11. – С. 16-24.
9. Казакевич В.В. Автоколебания (помпаж) в компрессорах: моногр. / В.В. Казакевич. – М.: Машиностроение, 1979. – 264 с.
10. Гоцуленко В.В. Управление автоколебаниями вибрационного горения / В.В. Гоцуленко, А.М. Павленко, Б.И. Басок // Промышленная теплотехника. – 2005. – Т. 27, № 1. – С. 9-13.
11. Зельдович Я.Б. Теория нестационарного горения пороха: моногр. / Я.Б. Зельдович, О.И. Лейпунский, В.Б. Либрович. – М.: Наука, 1975. – 132 с.
12. Гоцуленко В.В. Возрастание амплитуды колебаний порождающих энтропийные волны в процессе сгорания топлива в ЖРД / В.В. Гоцуленко, В.Н. Гоцуленко // 6-й Минский международный фо-

рум по тепло- и массообмену: тез. докл. и сообщ. – Минск, 19–23 мая 2008 г. – Т. 1. – С. 320-321.

13. Гоцуленко В.В. Особенности феномена Рийке, явления поющего пламени Хиггинса и вибрационного горения в ЖРД моделирование / В.В. Гоцуленко, В.Н. Гоцуленко // Сб. научн. тр. Днепро-

дзержинского гос. техн. ун-та. – Днепродзержинск, 2008. – Вып. 1 (9). – С. 147-155.

14. Николаев Б.А. Термодинамический расчет реактивных двигателей: моногр. / Б.А. Николаев. – М.: Оборонгиз, 1960. – 148 с.

Поступила в редакцию 2.09.2008

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. кафедры Б.П. Довгалюк, Днепродзержинский государственный технический университет, Днепродзержинск.

### ТЕОРЕТИЧНИЙ ОПИС АВТОКОЛИВАНЬ ВІБРАЦІЙНОГО ГОРІННЯ В МОДЕЛІ РІДИННОГО РЕАКТИВНОГО ДВИГУНА

*В.В. Гоцуленко*

Аналітично визначені автоколивання вібраційного горіння в моделі РРД, які збуджуються при дії різних механізмів. Обґрунтовано зниження їхньої амплітуди або повна нейтралізація таких коливань. Теоретичний опис вібраційного горіння представлено повною системою рівнянь механіки газів, у якій рівняння енергії зведено до напірної характеристики теплопідвода, яка визначає характер перетворення теплоти в напір потоку. Це дозволило встановити раніше невідомі механізми цього явища, які обумовлені утворенням висхідної гілки на відповідній характеристиці, а також одержати розв'язок цієї системи і, крім того, виродженої системи із запізнюванням, яка раніше розглянута в теорії РРД.

**Ключові слова:** вібраційне горіння, термоакустичні автоколивання, напірна характеристика теплопідводу, феноменологічне запізнювання, тепловий опір, нестійкість.

### THEORETICAL DEFINITION OF SELF-OSCILLATIONS OF VIBRATING BURNING IN MODEL OF THE LIQUID JET ENGINE

*V.V. Gotsulenko*

Self-oscillations of the vibratory burning are defined analytically in the LRE (liquid reactive engine) model that excite during action of the different mechanisms. Lowering of their amplitudes or the complete suppression of that oscillations are substantiated. Theoretical description of the vibratory burning is presented by the complete system of gas mechanics equations in which the equation of energy is getting to the pressure characteristic of the heating drive defining transformation of it into pressure of stream. It permitted to ascertain sooner unknowing mechanisms of this phenomenon that are conditioned by the formation of increasing branch on the appropriate characteristics and also to get solutions of this system and besides degenerative system with tardiness that sooner was examined for the theory of LRE.

**Key words:** vibrating burning, thermoacoustic self-oscillations, the pressure head characteristic, phenomenological delay, thermal resistance, instability.

**Гоцуленко Владимир Владимирович** – канд. техн. наук, доцент кафедры компьютерных и информационных технологий института предпринимательства “Стратегия”, Желтые Воды, Украина, e-mail: gosul@ukr.net.