

УДК 629.76.03

**В. В. СПЕСИВЦЕВ***Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ВЛИЯНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В КАМЕРЕ РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ НА РЕЖИМ ИСТЕЧЕНИЯ ГАЗА ИЗ СОПЛА**

*Рассмотрено влияние потерь на режимы работы камеры ракетного двигателя. Получено уравнение влияния гидравлических потерь в камере на степень нерасчетности истечения. Разработано уравнение для расчета ожидаемого удельного импульса тяги, в котором предусмотрены не только компенсация потерь импульса, но и корректировка конструкции для работы камеры на режиме полного расширения газов. Установлено, что потери в камере по-разному влияют на составляющие тяги. Показано, что на основные геометрические размеры камеры влияют гидродинамические потери в камере сгорания, в докритической и в закритической частях сопла. Из расчетов видно, что отсутствие корректировки конструкции приводит к потерям удельного импульса вследствие недорасширения более чем на 10%.*

**Ключевые слова:** камера ракетного двигателя, проектирование, учет потерь, корректировка конструкции камеры, ожидаемый импульс тяги, коэффициент сопла, испытания.

**Принятые условные обозначения**

$P$  – тяга;  
 $M$  – число Маха;  
 $I_y$  – удельный импульс тяги;  
 $w$  – скорость истечения;  
 $\dot{m}$  – расход топлива;  
 $a$  – скорость звука;  
 $F$  – площадь сечения;  
 $p$  – давление газа;  
 $\beta$  – расходный комплекс;  
 $\varphi_\beta$  – импульсный КПД;  
 $\sigma_f$  – коэффициент потерь давления;  
 $\mu_c$  – коэффициент расхода сопла;  
 $\varphi_k$  – коэффициент камеры сгорания;  
 $\varphi_c$  – коэффициент сопла;  
 $n_n$  – степень нерасчетности сопла;  
 $T$  – температура абсолютная;  
 $\bar{\lambda}_a = \lambda_a / \lambda_{\max}$ ;  $\lambda_a$  – коэффициент скорости.

**Индексы**

$k$  – камера сгорания;  
 $кр$  – критические параметры;  
 $a$  – параметры среза сопла;  
 $t$  – теоретическое значение;  
 $d$  – действительное значение;  
 $p$  – пустотное значение параметра;  
 $оп$  – параметры, измеренные в опыте,  
 $n$  – параметры окружающей среды.

**Введение**

Проектирование ракетного двигателя предполагает адекватный учет потерь, возникающих в реальной конструкции. В настоящее время учет потерь сводится в основном к компенсации потерь энергии дополнительным расходом топлива. Однако некоторые виды потерь оказывают влияние на размеры элементов конструкции, и поэтому требуется ее коррекция. В научной литературе [1] и [2] имеются разногласия в расчетах площади выходного сечения сопла, оказывающего влияние на энергетические характеристики двигателя.

Статья посвящена разрешению этого противоречия и исследованию влияния действительных условий течения на режим работы сопла.

**1. Влияние потерь на основные размеры камеры**

Главной характеристикой двигателя является тяга. Она закладывается в задание на проектирование. Тяга выражается формулой

$$P = \dot{m} I_y. \quad (1)$$

Действительное значение удельного импульса тяги определяют по теоретическому импульсу и коэффициентам потерь по уравнению

$$I_{уд} = I_{ут} \varphi_k \varphi_c. \quad (2)$$

В случае потерь для сохранения величины тяги

необходимо соответственно увеличить расход топлива

$$\dot{m}_д = \frac{\dot{m}_т}{\varphi_k \varphi_c} \quad (3)$$

Совершенство процессов в камере оценивают при помощи расходного комплекса и характеристической скорости. Выражение для расходного комплекса, записанное в двух видах

$$\beta = \frac{\sqrt{RT_k}}{A_n} = \frac{p_k F_{кр}}{\dot{m}} \quad (4)$$

Отношение действительного и теоретического значений расходного комплекса обозначают коэффициентом

$$\varphi_\beta = \sqrt{\frac{T_{кд}}{T_{кт}}} \quad (5)$$

Отношение характеристических скоростей обозначают коэффициентом  $\varphi_k$ . Связь между этими коэффициентами выражается уравнением

$$\varphi_k = \varphi_\beta \sigma_f \mu_c \quad (6)$$

Используя уравнения (3) и (6), запишем выражение для действительного расхода,

$$\dot{m}_д = \frac{\dot{m}_т}{\varphi_\beta \sigma_f \mu_c \varphi_c} \quad (7)$$

Рассмотрим влияние основных видов потерь, предусмотренных коэффициентами в знаменателе формулы (7), на изменение геометрии сопла. Используя формулу (4), запишем отношение площадей характерных сечений камеры для действительного и теоретического сопла. Условия, которые необходимо выполнить при проектировании,

$$p_{кд} = p_{кт} \quad \text{и} \quad p_{ад} = p_{ат} \quad (8)$$

Потери в камере сгорания приводят к снижению действительной температуры газов и уменьшению значения действительного расходного комплекса (см. (4) и (5)). Для компенсации этих потерь необходимо увеличить расход топлива через камеру согласно уравнению (7). Тогда, для  $\varphi_\beta < 1,0$ ;  $\sigma_f = \mu_c = \varphi_c = 1,0$ :

$$\frac{F_{крд}}{F_{крт}} = \frac{p_{кт} \beta_d \dot{m}_д}{p_{кд} \beta_t \dot{m}_т} = \frac{p_{кт} \beta_t \varphi_\beta \dot{m}_т}{p_{кд} \beta_t \dot{m}_т \varphi_\beta} = 1,0 \quad (9)$$

Изменений в конструкции проводить не надо.

Гидравлические и газодинамические потери в камере сгорания и в докритической части сопла учитывают дополнительно. В этом случае:

$$\varphi_\beta < 1,0; \sigma_f < 1,0; \mu_c < 1,0; \varphi_c = 1,0.$$

Искомое отношение после соответствующих подстановок примет вид

$$\frac{F_{крд}}{F_{крт}} = \frac{1}{\sigma_f \mu_c} \quad (10)$$

Для компенсации гидравлических и газодинамических потерь в камере сгорания необходимо увеличить расход топлива и кроме того увеличить площадь критического сечения сопла. Полученное уравнение может быть использовано также при проектировании камеры без закритической части сопла.

Аналогично получим искомое отношение для камеры, снабженной сверхзвуковым соплом. Коэффициент сопла также меньше единицы.

$$\frac{F_{крд}}{F_{крт}} = \frac{1}{\sigma_f \mu_c \varphi_c} \quad (11)$$

Переходим к проектированию сопла.

До этого момента противоречий в литературе по вопросу проектирования камер нет. Различные уравнения предлагаются авторами работ (1) и (2) для определения площади среза сопла.

Рассмотрим получение расчетной зависимости площади среза действительного сопла автором работы [1]. Из уравнения расхода газа для среза сопла записано отношение площадей среза действительного и теоретического сопла

$$\frac{F_{ад}}{F_{ат}} = \frac{\dot{m}_д \rho_{ат} w_{ат}}{\dot{m}_т \rho_{ад} w_{ад}} \quad (12)$$

Использованы уравнение состояния газа, условие (8)

$$\frac{\rho_{ат}}{\rho_{ад}} = \frac{p_{ат}}{RT_{ат}} \frac{RT_{ад}}{p_{ад}} = \frac{T_{ад}}{T_{ат}}, \quad (13)$$

уравнение изоэнтропы расширения газов от давления в камере до давления на срезе сопла

$$\frac{T_{ад}}{T_{кд}} = \left( \frac{p_a}{p_k} \right)^{\frac{n-1}{n}} = \frac{T_{ат}}{T_{кт}} \quad (14)$$

После подстановки в уравнение (12) отношений (2), (3), (5) и (14), пренебрегая гидравлическими потерями в камере сгорания, автор получил

$$\frac{F_{ад}}{F_{ат}} = \frac{1}{\varphi_c^2}. \quad (15)$$

Авторы работы [2] использовали уравнение расхода газа, записанное для двух сечений (критического и среза), и выразили относительную площадь сопла (уширение сопла)

$$\bar{F}_a = \frac{F_a}{F_{кр}} = \frac{\rho_{кр} a_{кр}}{\rho_a w_a}. \quad (16)$$

Далее использовали однозначную зависимость степени уширения сопла от числа Маха на срезе

$$\frac{F_a}{F_{кр}} = \frac{\left[1 + (n-1)M_a^2/2\right]^{(n+1)/[2(n-1)]}}{M_a \left[(n+1)/2\right]^{(n+1)/[2(n-1)]}}. \quad (17)$$

Напомним, что число Маха выражается через отношение давлений в камере и на срезе сопла уравнением

$$M_a^2 = \left[ \left( \frac{p_k}{p_a} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \frac{2}{n-1}. \quad (18)$$

Анализируя уравнение (17), учитывая условия (8) и уравнение (18), авторы сделали следующий вывод. Цитата: «Если не учитывать изменение показателя расширения газов в сопле и принять его равным показателю изоэнтропы, то при заданных  $p_k$  и  $p_a$  справедливо равенство

$$\frac{F_{ад}}{F_{крд}} = \frac{F_{ат}}{F_{крт}}.» \quad (19)$$

Формула (19) гласит, что уширение теоретического и уширение действительного сопла равны. Далее авторы используют упрощенную зависимость (11) и приводят окончательное уравнение для расчета действительной площади среза сопла

$$\frac{F_{ад}}{F_{ат}} = \frac{1}{\varphi_c}. \quad (20)$$

Сравним уравнения (15) и (20).

Для выяснения причин расхождения результатов рассмотрим процессы в действительном сопле. Трение газа о стенки сопла приводит к потере скорости и возрастанию давления в потоке. Таким образом, давление на срезе сопла в действительном течении становится выше теоретического, и, следо-

вательно, действительное сопло при наличии потерь начинает работать на режиме недорасширения газов. При этом перепад давлений на сопле уменьшается, что влечет за собой снижение расхода. Для пропуска заданного расхода, прошедшего через критическое сечение, необходимо увеличить перепад давлений на сопле. При заданном давлении в камере сгорания это возможно только за счет понижения давления на срезе сопла. Увеличение уширения сопла понижает давление на срезе, обеспечивает более полное расширение газов и проход через него заданного расхода топлива.

Проведем сравнение уширений действительного сопла с теоретическим другим путем. Для этого используем уравнение (16), которое было принято за основу при получении зависимости (17). Запишем отношение уширений для действительного и теоретического сопел

$$\frac{\bar{F}_{ад}}{\bar{F}_{ат}} = \frac{(\rho_{кр}/\rho_a)_д a_{крд} w_{ат}}{(\rho_{кр}/\rho_a)_т a_{крт} w_{ад}}. \quad (21)$$

Если заменить отношение плотностей по уравнению изоэнтропы расширения через отношение давлений в характерных сечениях камеры, то с учетом (8), эти члены в уравнении (21) можно сократить. Критическую скорость выразим через полную температуру в камере, а отношение скоростей на срезе сопла выразим, используя уравнение (2). Тогда, после соответствующих подстановок в уравнение (21) с использованием зависимости (5), получим

$$\frac{\bar{F}_{ад}}{\bar{F}_{ат}} = \frac{\varphi_\beta}{\varphi_k \varphi_c} = \frac{1}{\sigma_f \mu_c \varphi_c}. \quad (22)$$

Отсюда видно, что степень уширения действительного сопла при наличии гидравлических потерь должна быть больше теоретической. На увеличение уширения влияют гидродинамические потери в камере сгорания и в сопле. С учетом уравнения (10) получим отношение площадей среза действительного и теоретического сопел

$$\frac{F_{ад}}{F_{ат}} = \frac{1}{(\sigma_f \mu_c \varphi_c)^2}. \quad (23)$$

Эта формула аналогична уравнению (15).

Из анализа уравнения (23) видно, что нельзя пренебрегать также и гидродинамическими потерями в камере сгорания  $\sigma_f$  и  $\mu_c$ , так как они входят в выражение в виде произведения во второй степени.

Продолжим рассмотрение процесса течения газа в сопле. Трение газа о стенки сопла приводит к потере скорости и возрастанию давления в потоке.

Следовательно, потери в сопле сопровождаются ростом противодавления. Таким образом, давление газа на срезе сопла в действительном течении выше теоретического, и, следовательно, действительное сопло за счет гидродинамических потерь работает на режиме недорасширения газов. Иными словами, если в идеальном сопле, работающем на расчетном режиме, вдруг появляются гидродинамические потери, то оно сразу переходит на режим недорасширения.

Сила трения, действующая на стенку сопла со стороны газового потока, уменьшает тягу, так как направлена в противоположную сторону. В работе [1] она названа «тянушей». Для компенсации потерь тяги в камеру сгорания подают дополнительный расход топлива. При этом давление в камере сгорания и на срезе сопла становятся выше заданного. Для приведения их в соответствие, расширяют критическое сечение по уравнению (10) и на такую же величину повторно увеличивают площадь среза для пропуска компенсирующего расхода топлива. На этом проектирование основных размеров сопла, соответствующих заданным параметрам, заканчивается.

Таким образом, потери в камере приводят к режиму истечения из сопла с недорасширением газов. Нерасчетность режима истечения определяют коэффициентом степени нерасчетности сопла.

При анализе скорости истечения газов из сопла и потерь в камере нами получено уравнение влияния коэффициентов потерь на степень нерасчетности сопла

$$n_H = \left[ \frac{1 - \bar{\lambda}_a^2 (\sigma_f \mu_c \varphi_c)^2}{1 - \bar{\lambda}_a^2} \right]^{\frac{n}{n-1}}. \quad (24)$$

В идеальных условиях на срезе сопла имеет место расчетный режим истечения газов. С появлением потерь значение коэффициента степени нерасчетности сопла принимает значение больше единицы. Это соответствует режиму недорасширения газов в сопле.

Перечислим основные процедуры при проектировании камеры. Последовательность их проведения может быть иной.

1. Компенсация потерь, связанных с несовершенством процессов горения, производится подачей дополнительного расхода топлива. Корректировка основных размеров камеры не требуется.

2. В связи с установлением в действительных условиях на срезе теоретического сопла повышенного давления производится первая корректировка геометрии сопла. Увеличивают степень уширения сопла по уравнению (22), добываясь полного расши-

рения газов в сопле до давления, соответствующего заданному условию (8).

3. Сила трения, действующая на стенку сопла, уменьшает тягу. В камеру сгорания подают дополнительный расход топлива для восстановления уровня заданной тяги.

4. После подачи дополнительного расхода давления в камере сгорания и на срезе сопла возрастают и, для доведения их до заданных значений, корректируют площадь критического сечения по уравнению (10) первый раз, а сечение среза сопла, для сохранения коэффициента уширения, корректируют вторично.

Замечание по применению уравнения (17) при газодинамических расчетах. Это уравнение в настоящее время очень широко используют для расчетов как теоретических, так и действительных параметров в сопле. Оно очень удобно, так как степень уширения сопла однозначно определяется числом Маха. Однако в действительных условиях за счет потерь и появления противодавления однозначность числа Маха рассматриваемому сечению пропадает.

Покажем эту неоднозначность. После учета потерь и проведения соответствующих процедур получено действительное сопло. Применяя уравнения (18) и (17) к действительному соплу получим, что число Маха на срезе действительного сопла осталось неизменным, несмотря на увеличение уширения.

С другой стороны, сравним числа Маха действительного и теоретического сопла, рассчитанные через отношение скоростей

$$\frac{M_{ад}}{M_{ат}} = \frac{w_{ад}}{a_{ад}} \frac{a_{ат}}{w_{ат}} = \frac{\varphi_k \varphi_c}{\varphi_\beta} = \sigma_f \mu_c \varphi_c. \quad (25)$$

Здесь использованы условие (8), уравнение изэнтропы расширения газов в сопле, уравнения (2) и (5). Как видим, числа Маха равны при отсутствии потерь, а в действительном течении число Маха зависит от потерь в камере.

Следовательно, для действительных условий течения в сопле необходимо проводить расчеты путевых потерь в проточной части и вводить поправочный коэффициент при нахождении степени уширения рассматриваемого сечения. Структура коэффициента аналогична правой части уравнения (22) для среза сопла.

Статистические значения коэффициентов показывают, что отклонение площади среза действительного сопла от теоретического может достигать (14...30)%. Поэтому при проектировании камеры необходимо выбрать ожидаемые значения коэффициентов потерь. При расчетах величины ожидаемого удельного импульса необходимо корректировать

размеры и степень уширения сопла в соответствии с потерями в камере.

## 2. Корректировка уравнения удельного импульса

Рассмотрим расчет ожидаемого действительно удельного импульса. В качестве примера возьмем уравнение удельного импульса тяги в пустоте

$$I_{уд}^п = \left( w_{ат} + \frac{P_a F_{ат}}{\dot{m}_T} \right) \varphi_k \varphi_c. \quad (26)$$

В приведенном уравнении, взятом из работы [3], относительные площади среза действительного и теоретического сопел приняты равными согласно выражению (19). В связи с этим уравнение (26) оказывается некорректным. В этом уравнении коэффициенты камеры и сопла компенсируют потери удельного импульса увеличением расхода топлива в соответствии с уравнением (3). Корректировка размеров теоретического сопла в этом уравнении не предусмотрена. В действительных условиях сопло будет работать на режиме недорасширения, давление на срезе будет выше заданного, а скорость истечения, за счет уменьшения перепада давлений на сопле, пониженной. Таким образом, в действительности происходит искажение теоретических параметров, приведенных в скобках. Раскроем скобки и, после преобразования этого уравнение с привлечением зависимости (23), получим

$$I_{уд}^п = w_a \varphi_k \varphi_c + \frac{P_a F_{ат}}{\dot{m}_T} \frac{\varphi_k}{(\sigma_f \mu_c)^2 \varphi_c}. \quad (27)$$

Отсюда видно, что гидравлические потери в камере неодинаково влияют на динамическую и статическую составляющие удельного импульса. Статическая составляющая даже возрастает с ростом гидравлических потерь (за счет увеличения площади среза сопла). Динамическая составляющая только уменьшается за счет несовершенства процессов в камере сгорания и в сопле.

Представим запись этого уравнения в привычном виде, используя уравнение (4)

$$I_{уд}^п = \left( w_{ат} + \frac{P_a \bar{F}_{ат} \beta_T}{P_k} \frac{1}{(\sigma_f \mu_c \varphi_c)^2} \right) \varphi_k \varphi_c. \quad (28)$$

Здесь выражение в скобках содержит только теоретические параметры. Если коэффициенты, вынесенные за скобки, компенсируют потери импульса в камере двигателя, то те же коэффициенты, приве-

денные в скобках, отвечают за корректировку размеров сопла.

Проведены расчеты потерь удельного импульса при отсутствии корректировки конструкции, в диапазоне степеней понижения давления в сопле от 300 до 3000 при использовании данных справочника [4]. Для крайних статистических значений импульсных коэффициентов гидродинамических потерь получено снижение удельного импульса в диапазоне (2,0...10,3)%.

## 3. Определение коэффициента сопла при испытаниях двигателя

Согласно определению [3] коэффициент сопла равен отношению действительного коэффициента тяги в пустоте к идеальному значению этого коэффициента. Уравнение для нахождения коэффициента сопла по результатам стендовых измерений выглядит так

$$\varphi_c = \frac{P^{оп} + P_H^{оп} F_a^{оп}}{\dot{m}^{оп} \varphi_k^{оп}} \frac{1}{I_{ут}^п}. \quad (29)$$

Коэффициент камеры определяется стандартным методом в этом же эксперименте с использованием характеристической скорости.

При стендовой отработке камеры необходимо помнить, что опытное значение площади среза сопла должно, согласно формуле (23), отличаться от теоретического. В противном случае при огневых испытаниях появятся потери тяги, связанные с недорасширением, а приписаны они будут к процессам в сопле.

## Выводы

1. Получено уравнение влияния гидродинамических потерь в камере на степень нерасчетности истечения газов из сопла (24).

2. Газодинамические расчеты в проточной части действительного сопла с использованием зависимости (17) требуют внесения поправок на путевые потери в сопле.

3. Разработано уравнение (28) для определения ожидаемого удельного импульса тяги камеры в случае корректировки конструкции и обеспечения полного расширения газов в сопле.

4. Даны рекомендации по отработке камеры при стендовых испытаниях ракетного двигателя.

## Литература

1. Добровольский, М. В. Жидкостные ракетные двигатели [Текст] / М. В. Добровольский. – М. : Машиностроение, 1968. – 396 с.
2. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей [Текст] / А. П. Васильев, В. М. Кудрявцев, В. А. Кузнецов и др. – М. : Высшая школа, 1983. – 704 с.
3. Алемасов, В. Е. Теория ракетных двигателей [Текст] / А. Е. Алемасов, А. Ф. Дрегалин, А. П. Тишин. – М. : Машиностроение, 1980. – 534 с.
4. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания [Текст] : справочник в 10 томах / В. Е. Алемасов, А. Ф. Дрегалин, А. П. Тишин и др. – М. : АН СССР, ВИНТИ, 1971 – 1980.

## References

1. Dobrovolskii, M. V. *Zhidkostnye raketnye dvigateli* [Liquid rocket engine]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968. 396 p.
2. Vasil'ev, A. P., Kudryavtsev, V. M., Kuznetsov, V. A., Kurpatenkov, V. D., Obel'nitskii, A. M., Polyayev, V. M., Poluyan, V. Ya. *Osnovy teorii i rascheta zhidkostnykh raketnykh dvigatelei* [Fundamentals of the theory and calculation of liquid rocket engines]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1983. 704 p.
3. Alemasov, V. E., Dregalin, A. F., Tishin, A. P. *Teoriya raketnykh dvigatelei* [Theory of rocket engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980. 534 p.
4. Alemasov, V. E., Dregalin, A. F., Tishin, A. P., Khudyakov, V. A., Kostin, V. N. *Termodinamicheskie i teplofizicheskie svoystva produktov sgoraniya*. [Thermodynamic and thermophysical properties of the combustion products]. Reference book in 10 vol. Moscow, AN SSSR, VINITI Publ. 1971-1980.

Поступила в редакцию 28.08.2016, рассмотрена на редколлегии 16.09.2016

#### ВПЛИВ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ВТРАТ В КАМЕРІ РАКЕТНОГО ДВИГУНА НА РЕЖИМ ТЕЧІЇ ГАЗУ З СОПЛА

**В. В. Спесивцев**

Розглянуто вплив втрат у камері на режими роботи камери ракетного двигуна. Одержано рівняння впливу гідродинамічних втрат у камері на ступень неразрахунковості течії. Розроблено рівняння за для розрахунку очікуваного питомого імпульсу тяги, у якому передбачено не тільки компенсація втрат імпульсу, а також коректування конструкції за для роботи камери на режимі повного розширення газів. Встановлено, що втрати у камері по-різному впливають на складові частини тяги. Показано, що на основні геометричні розміри камери впливають гідродинамічні втрати у камері згорання, дозвукової та надзвукової частинах сопла. Із розрахунків видно, що відсутність коректування конструкції приводить до втрати питомого імпульсу внаслідок недорасширення більш як на 10%.

**Ключові слова:** камера ракетного двигуна, проектування, урахування втрат, коректування конструкції камери, очікуваний імпульс тяги, коефіцієнт сопла, випробування.

#### THE AFFECTION OF HYDRODYNAMIC LOSSES IN THE ROCKET ENGINE'S CHAMBER ON MODE OF GAS OUTFLOW FROM NOZZLE

**V. V. Spesivtsev**

The affection of losses on operation modes of rocket engine's chamber has been considered. The equation of affection of hydraulic losses in chamber on non-calculation degree of outflow has been obtained. The equation for calculation of expected specific impulse of thrust has been worked out. In this equation not only compensation of impulse losses but and the correction of construction for chamber operation at gas full expansion mode have been envisaged. It was founded the losses in chamber affect in different ways the components of thrust. It was showed the hydrodynamic losses in combustion chamber, subcritical and supercritical parts of the nozzle affect main geometric dimensions of chamber. It is seen from the calculations the absence of the correction of construction leads to losses of specific impulse because of underexpansion more than 10%.

**Keywords:** rocket engine's chamber, engineering design, the account of losses, the correction of construction of chamber, expected specific impulse, coefficient of nozzle, testing.

**Спесивцев Виктор Васильевич** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры конструкций и проектирования ракетной техники, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: viktorspesivtsev@mail.ru.

**Spesivtsev Viktor Vasil'evich** – Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Dept. of construction and design rocket technics, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky "KhAI", Kharkov, Ukraine, e-mail: viktorspesivtsev@mail.ru.