

Алгоритм расчета кинематических характеристик эластично-опорного шарнира поворотного сопла ракетного двигателя твердого топлива

© Ю.В. Костиков, Н.В. Сумнительный, Р.С. Рязанов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Для обеспечения устойчивого положения и требуемого направления движения летательного аппарата по заданной траектории в корпус твердотопливного ракетного двигателя устанавливают поворотное управляющее сопло с предварительно поджатым эластично-опорным шарниром. В статье рассмотрен алгоритм аналитического исследования кинематики поворотного управляющего сопла твердотопливного ракетного двигателя для заданного быстродействия. Приведен общий вид математической функции изменения угловой скорости подвижной части ракетного двигателя для безударного режима движения пуск–останов. Исследована возможность изменения параметра ограничения времени при отклонении подвижной части сопла. Представлен алгоритм расчета закона движения с учетом инерционных составляющих сопла. Проведенное исследование позволит изменять направление вектора скорости летательного аппарата на требуемое отклонение от заданной траектории полета с минимальными погрешностями.

Ключевые слова: *твердотопливный ракетный двигатель, поворотное управляющее сопло, эластично-опорный шарнир, гидравлический рулевой механизм, режим пуск–останов*

Для управления движением летательного аппарата (ЛА) в соответствии с требуемой траекторией необходимо иметь возможность изменять в полете значение и направление вектора скорости, а также ориентацию осей ЛА в пространстве. Для этой цели используют реактивные двигатели и различные органы управления, действие которых позволяет получить необходимые силы и моменты. Для создания управляющих моментов по каналам рыскания и тангажа ракетных двигателей твердого топлива (РДТТ) с различными узлами подвеса применяют поворотнo-управляющие сопла (ПУС) со сферическими подвесами разнообразных конструкций [1, 2]. Приводы исполнительных органов управления могут быть гидравлическими, пневматическими, газовыми или электрическими. Использование ПУС энергетически является наиболее экономичным способом изменения вектора тяги, так как управляющая сила создается в результате осесимметричного и практически равномерного истечения продуктов сгорания и одновременного поворота докритической и закритической частей сопла [3].

Критериями оптимальности при выборе управляющих сопел на начальных этапах проектирования можно считать малые потери тяги

в процессе функционирования сопел, линейную зависимость управляющей силы от угла поворота и высокое быстродействие, характеризующееся временем отклонения ПУС не более 0,5 с [4, 5].

Однако значительный момент трения в узлах сочленения, сложность узла уплотнения и крайне жесткие условия работы узла поворота оказывают негативное влияние на действие поворотных управляющих сопел, используемых в РДТТ, что может привести к заклиниванию двигателя. Эффективность поворотных сопел во многом определяется типом уплотнения [1, 5–7].

С точки зрения требований, предъявляемых к современным РДТТ, наиболее предпочтительным типом уплотнения является эластично-опорный шарнир (ЭОШ) (рис. 1) [4, 6]. Этот шарнир представляет собой заключенный между подвижным и неподвижным опорными фланцами кольцевой пакет, состоящий из чередующихся эластомерных слоев и жестких тарелок с единым центром сферических контактирующих поверхностей [1, 2, 6]. Такой тип подвеса обладает наименьшей массой, относительно прост в изготовлении и нашел широкое применение в существующих отечественных и зарубежных РДТТ [3, 7, 8].

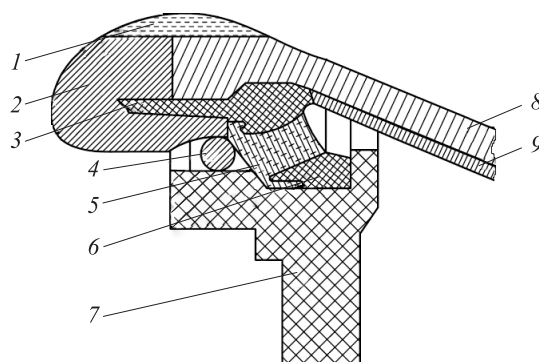


Рис. 1. Схема поворотного сопла на эластично-опорном шарнире:

1 — пирографит; 2 — углерод-углеродный композиционный материал; 3, 6 — опорные кольца; 4 — спиральная намотка теплоустойчивого материала; 5 — ЭОШ; 7 — неподвижная часть сопла; 8 — стеклопластик; 9 — сталь 30ХГСА

Конструктивная компоновка системы ПУС определяет динамические свойства управления вектором тяги, эта система является исполнительным устройством системы управления полетом ракеты. Рациональным выбором компоновки системы ПУС минимизируются значения сил, требуемые для отклонения ЛА при перемещении штока гидравлической рулевой машинки. Важным аспектом является математическое описание ПУС, в частности его кинематики [1, 9, 10].

Цель данного исследования — разработка алгоритма расчета кинематических характеристик ПУС РДТТ на ЭОШ с гидравлической рулевой машинкой методами теории механизмов и машин при решении задач динамики для механизмов с одной степенью свободы.

При отклонении подвижной части сопла в элементах ЭОШ возникает момент сопротивления повороту органа управления — шарнирный момент $M_{ш}$. В связи с этим при проектировании ПУС чрезвычайно важно правильно спрогнозировать значения момента сопротивления и влияние его составляющих на рабочие параметры РДТТ [4, 6].

Шарнирный момент $M_{ш}$ — наибольший суммарный момент сопротивления повороту органа рулевого управления с заданными угловой скоростью ω , угловым ускорением ε и углом поворота φ .

В общем случае аналитическая зависимость шарнирного момента может определяться следующей формулой [3, 4]:

$$M_{ш} = M_{дем}(\omega(t)) + M_{ин}(\varepsilon(t)) + M_{тр}(\varphi(t)) + M_{поз}(\omega(t)), \quad (1)$$

где $M_{дем}(\omega(t))$ — момент демпфирования газовой струи при отклонении ее с угловой скоростью ω ; $M_{ин}(\varepsilon(t))$ — момент инерционных сил подвижных частей органа управления; $M_{тр}(\varphi(t))$ — суммарный момент трения во всех соединениях органа управления; $M_{поз}(\omega(t))$ — позиционный момент, пропорциональный углу поворота.

Составляющие зависимости (1) описывают основные факторы возникновения шарнирного момента [3, 6].

С учетом геометрии, параметров работы ПУС уравнение (1) можно представить в виде [3]

$$M_{ш} = \frac{(\sqrt{f_a} - 1)^2}{K_R P_k \sin^2 \beta} \left(\frac{\omega(t)}{\pi I_{уд}} + \frac{\rho_c h_c (f_a - 1)}{K_R P_k \sin \beta} \varepsilon(t) \right) R^2 + 4 f_{тр} \frac{b_{упл}}{K_R} R + M_{поз}(\varphi(t)), \quad (2)$$

где $f_a = F_a / F_{кр}$ — степень уширения сопла; F_a — площадь среза сопла; $F_{кр}$ — площадь критического сечения сопла; K_R — коэффициент тяги; P_k — давление в камере сгорания; β — угол полураскрытия сопла; $I_{уд}$ — удельный импульс; ρ_c — плотность материала сопла; h_c — средняя толщина стенки по длине сопла; $R = K_R P_k F_{кр}$ — тяга двигателя; $f_{тр}$ — сила трения; $b_{упл}$ — ширина уплотнительного материала.

Позиционный момент является основной составляющей суммарного шарнирного момента ПУС РДТТ, приближенно его можно определить следующим образом:

$$M_{поз}(\varphi) = k \varphi l, \quad (3)$$

где k — жесткость ЭОШ; l — плечо, равное расстоянию от точки крепления рулевой машинки до центра поворота подвижной части ПУС.

Для поворота сопла на требуемый угол необходим орган управления. Масса его конструкции и приводов должна быть мала, необходимо, чтобы он был прост в эксплуатации, создавал минимальные потери удельного импульса и чтобы значение управляющей силы определялось линейным характером зависимости от угла поворота. Всем этим требованиям наиболее полно отвечают гидравлические рулевые механизмы — рулевые машинки [5, 7, 10].

Механизм рулевой машинки состоит из гидравлического цилиндра с поршнем, шток которого шарнирно соединен с подвижной камерой сопла. Поворот осуществляется подачей рабочей жидкости от гидронасоса в полость гидроцилиндра. Регулирование подачи контролируется в соответствии с различными технологиями.

Конструктивная разработка современных поворотных сопел направлена на снижение требуемой мощности рулевого привода и обеспечение высокой надежности узла поворота. Для уменьшения усталостных напряжений, возникающих в ЭОШ, необходимо определить закон движения поворотного сопла РДТТ для безударного режима пуск–останов [11, 12].

Элементы ПУС РДТТ обладают следующими параметрами: физико-инерционными (материал составляющих, масса), рабочими (тяга, давление в камере), а также геометрическими. Все эти факторы являются входными величинами и определяются характеристиками моделируемого двигателя.

Расчет кинематических характеристик основывается на методе исследования динамики одномассовой динамической модели, фундаментальными входными варьируемыми величинами являются угол поворота ПУС φ и время поворота τ , определяющее быстродействие этого поворота. Изменение направления вектора скорости ограничивается значением параметра $\tau = 0,5$ с.

Методами исследования кинематики и динамики одномассовой динамической модели предусмотрен расчет передаточных функций и инерционных составляющих согласно общей теории механизмов и машин [11, 12]. За обобщенную координату принимают угол поворота φ , а в качестве звена приведения выбирают подвижную часть сопла ПУС РДТТ, геометрически обеспечивая нулевой угол давления в начале движения, чтобы уменьшить прилагаемую мощность рулевого привода. Расчетная кинематическая схема приведена на рис. 2.

Элементы ПУС РДТТ заменяют звеньями механизма, обладающими аналогичными инерционными составляющими. Траектория моделируемых частей характеризуется траекторией центров масс звеньев. Это позволяет применять стандартные приемы расчета теории механизмов и машин для аналитического исследования кинематики подвижной части сопла при его отклонении.

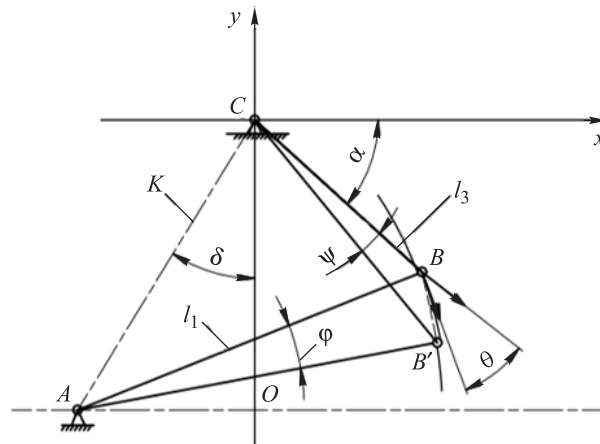


Рис. 2. Расчетная схема, поясняющая кинематику и синтез ПУС РДТТ: A — центр поворота сопла; C — верхнее положение штока рулевой машинки; CB, CB' — начальное и конечное положения гидроцилиндра соответственно; K — гипотенуза $\triangle CAO$; α — начальный угол положения гидроцилиндра; ψ — угол отклонения рулевой машинки от первоначального положения; δ — промежуточное значение угла, необходимое для синтеза механизма; l_1 — длина поворотного сопла от центра поворота до точки крепления рулевой машинки; l_2 — длина штока рулевой машинки; l_3 — длина штока рулевой машинки; φ — угол поворота; θ — угол давления

Закон движения подвижной части ПУС РДТТ определяют интегрированием уравнения движения динамической модели в дифференциальной форме [11, 12]:

$$\varepsilon(t) = \frac{M_{\Sigma}(\varphi)}{J_{\Sigma}^{np}(\varphi)} - \frac{\omega^2(t)}{J_{\Sigma}^{np}(\varphi)} \left(\frac{dJ_{\Sigma}^{np}(\varphi)}{d(\varphi)} \right), \quad (4)$$

где $M_{\Sigma}(\varphi)$, $J_{\Sigma}^{np}(\varphi)$ — суммарные приведенные моменты одномассовой динамической модели и инерции соответственно.

Суммарный приведенный момент $M_{\Sigma}(\varphi)$ одномассовой динамической модели в уравнении (4) является функцией разности движущего момента, зависящего от давления в гидроцилиндре, и шарнирного момента. Уравнение (2) включает в себя заданные законы угловой скорости $\omega(t)$ и углового ускорения $\varepsilon(t)$, поведение которых как функций обобщенной координаты изначально *неизвестно*. В связи с этим стандартный подход к задаче определения закона движения существенно усложняется. Для определения закона движения моделируемого ПУС РДТТ используют математические методы [13, 14]. В основу положена нелинейная аппроксимация непрерывной кривой некоторой функцией, имеющей характерный вид закона изменения движения пуск–останов.

Определена аналитическая зависимость, описывающая изменение теоретической угловой скорости $\omega_{\text{теор}}(t)$ в заданном диапазоне времени для безударного режима:

$$\begin{cases} \omega_{\text{теор}}(t) = Z \frac{e^{1/(Dt-1)}}{e^{1/Dt}}; \\ Z, D = \text{const} \in R. \end{cases} \quad (5)$$

Коэффициент D позволяет варьировать параметр ограничения времени τ отклонения подвижной части сопла для функции (5), диапазон времени изменяется в пределах $t \in [0; \tau]$ с. Коэффициент Z характеризует изменение модуля угловой скорости $\omega_{\text{теор}}(t)$ в пределах $t \in [0; \tau]$ с. Константы определяют подбором значения Z , исходя из условий, что входной параметр $\tau \leq 0,5$ с и площадь подынтегральной функции $\omega_{\text{теор}}(t)$ равна заданному углу поворота φ :

$$\int_0^{\tau} \omega_{\text{теор}}(t) dt = \varphi. \quad (6)$$

Зависимость углового ускорения от времени определяют аналитически:

$$\varepsilon_{\text{теор}}(t) = \frac{d\omega_{\text{теор}}(t)}{dt}.$$

Функцию вида (5) нельзя представить как сходящийся ряд, поэтому кривую зависимости

$$\varphi(t) = \int_0^t \omega_{\text{теор}}(t) dt$$

строят методом точечной аппроксимации или интегрируют графически на ЭВМ. Характерный вид кривых соответствует безударному режиму пуск–останов. В общем виде поведение функции (5) представлено на рис. 3.

По сравнению с силой тяги и давлением в гидроцилиндре габариты представляются малыми, поэтому целесообразно принять допущение о пренебрежении силами тяжести элементов рулевой машинки.

Используя подобранную зависимость (5) для моделируемого сопла и параметров отклонения, определяют функцию шарнирного момента (2). Суммарный приведенный движущий момент $M_{\Sigma}(\varphi)$ односторонней динамической модели в уравнении (4) и известная функция (2)

позволяют найти необходимый движущий момент, который создается силой давления в гидроцилиндре. Для определения давления задают процентное соотношение разности σ движущего и шарнирного моментов.

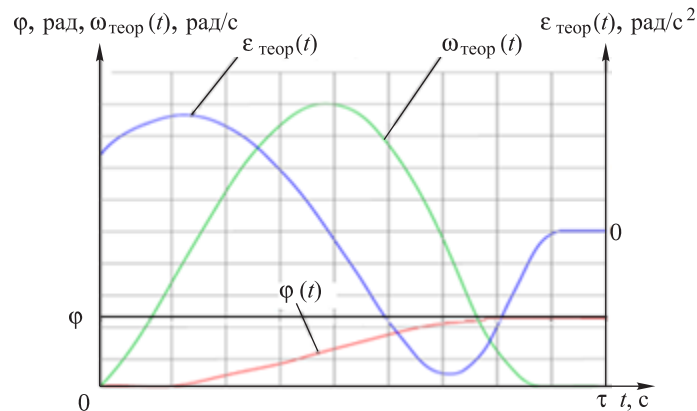


Рис. 3. Кинематические характеристики безударного движения для одного цикла режима пуск-останов

Давление в гидроцилиндре рулевой машинки вычисляют по выражению

$$p(\varphi(t)) = \frac{\left(1 + \frac{\sigma}{100}\right) M_{\text{ш}}(\varphi(t))}{S_p V_{qP}(\varphi(t))}, \quad (7)$$

где S_p — площадь поверхности давления на поршень; $V_{qP}(\varphi(t))$ — аналоговая скорость поршня.

Определяют суммарную работу движущего момента на звене приведения подвижной части сопла [8–10]:

$$A_{\Sigma} = \int_0^{\varphi} \frac{\sigma}{100} M_{\text{ш}}(\varphi) d(\varphi). \quad (8)$$

Согласно уравнению движения в форме энергии, рассчитывают реальный закон изменения расчетной угловой скорости $\omega_{\text{расч}}(t)$, в котором учитываются инерционные составляющие частей моделируемого ПУС РДГТ [11, 12]:

$$\omega_{\text{расч}}(t) = \sqrt{2 \frac{A_{\Sigma}(\varphi(t))}{J_{\Sigma}^{\text{нп}}(\varphi(t))}}. \quad (9)$$

Расчетное угловое ускорение приведенного звена определяется уравнением движения динамической модели в дифференциальной форме [11, 12]:

$$\varepsilon(t) = \frac{M_{\Sigma}(\varphi(t))}{J_{\Sigma}^{\text{пр}}(\varphi(t))} - \frac{\omega_{\text{расч}}^2(t)}{J_{\Sigma}^{\text{пр}}(\varphi(t))} \left(\frac{dJ_{\Sigma}^{\text{пр}}(\varphi(t))}{d(\varphi(t))} \right). \quad (10)$$

Интегрируя функцию угловой скорости, находят время цикла полного отклонения и рассчитывают закон движения проектируемого ПУС РДТТ [11, 12]:

$$t(\varphi) = \int_0^{\varphi} \frac{d(\varphi)}{\omega_{\text{расч}}(\varphi)}. \quad (11)$$

Заключение. Представленный алгоритм расчета позволяет обеспечить необходимое быстродействие отклонения и определить закон движения моделируемого поворотного сопла ракетного двигателя твердого топлива на эластично-опорном шарнире с гидравлической рулевой машинкой.

Алгоритм расчета и математическая модель функции угловой скорости дают возможность определять теоретические кинематические характеристики движения для одного цикла отклонения поворотного сопла РДТТ при безударном останове.

Приведенные математические зависимости позволяют аналитически исследовать получаемые выходные параметры закона движения подвижной части сопла РДТТ, учитывая широкий спектр варьируемых значений времени быстродействия при изменении направления вектора скорости для любых углов отклонения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Зайцев Н.Н., Наберухин Д.Г., Пьянков Д.А. Перемещение штока и изменение момента усилия рулевых машин при отклонениях поворотного управляющего сопла. *Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника*, 2016, № 46, с. 108–110.
- [2] Соломонов Ю.С., Липанов А.М., ред. *Твердотопливные регулируемые двигательные установки*. Москва, Машиностроение, 2011, 416 с.
- [3] Фахрутдинов И.Х., Котельников А.В. *Конструкция и проектирование ракетных двигателей твердого топлива*. Москва, Машиностроение, 1987, 328 с.
- [4] Волков В.Т., Ягодников Д.А. *Исследование и стендовая отработка ракетных двигателей на твердом топливе*. Москва, Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007, 296 с.
- [5] Лавров Л.Н., Болотов А.А., Гапаненко В.И. *Конструкции ракетных двигателей на твердом топливе*. Москва, Машиностроение, 1993, 532 с.
- [6] Межова М.П. Анализ конструктивных схем и методик расчета эластичного шарнира поворотного управляющего сопла. *Молодежный научно-технический вестник*, 2015, № 5. URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/782286.html>

- [7] Кузнецов Н.П., ред. *Органы управления вектором тяги твердотопливных ракет: расчет, конструктивные особенности, эксперимент*. Москва, Ижевск, Научно-исследовательский центр Регулярная и хаотическая динамика, 2006, 522 с.
- [8] Бондаренко А.С., Деменев Д.Н., Зайцев Н.Н. Учет требований системы управления полетом при анализе конструктивных вариантов поворотного управляющего сопла. *Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника*, 2013, № 34, с. 64–66.
- [9] Zhou J., Zhang J.L., Zhou F.Q. Research on multi-objective optimization design of thrust vector control actuator. *Advanced Materials Research*, 2012, vol. 591–593, pp. 15–20.
- [10] Виноцкий А.М., ред. *Конструкция и обработка РДДТ*. Москва, Машиностроение, 1980, 230 с.
- [11] Фролов К.В., Попов С.А., Мусатов А.К. *Теория механизмов и машин*. Фролов К.В., ред. Москва, Высшая школа, 2003, 496 с.
- [12] Тимофеев Г.А. *Теория механизмов и машин. Курс лекций*. Москва, Юрайт, 2010, 351 с.
- [13] Капцов О.В. *Методы интегрирования уравнений с частными производными*. Москва, Физматлит, 2009, 182 с.
- [14] Утяшев А.Р. Аппроксимация дифференциального уравнения систем управления уравнением второго порядка. *Тр. Братского государственного университета. Естественные и инженерные науки*, 2007, т. 2, с. 57–59.

Статья поступила в редакцию 22.02.2018

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Костиков Ю.В., Сумнительный Н.В., Рязанов Р.С. Алгоритм расчета кинематических характеристик эластично-опорного шарнира поворотного сопла ракетного двигателя твердого топлива. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 6. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-6-1768>

Костиков Юрий Васильевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Теория механизмов и машин» МГТУ им. Н.Э. Баумана.
e-mail: kostikov.iurij@yandex.ru

Сумнительный Никита Владимирович — студент кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: nik4ok@gmail.com

Рязанов Роман Станиславович — студент кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: yanemal@rambler.ru

Algorithm for computing kinematic characteristics of a flexible joint controlling a swivelling nozzle in a solid-propellant rocket engine

© Yu.V. Kostikov, N.V. Sumnitelnyy, R.S. Ryazanov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

In order to ensure a steady attitude and desired direction of spacecraft motion along a given trajectory, a swivelling control nozzle on a preloaded flexible joint may be installed in the housing of a solid-propellant rocket engine. The article describes an algorithm for analytically investigating the kinematics of a swivelling control nozzle in a solid-propellant rocket engine so as to achieve its desired performance. We present a general form of the mathematical function describing angular velocity variation in the moving part of the rocket engine for the case of a shock-free start-stop motion mode. We investigate whether it is possible to change the time limit parameter when the moving part of the nozzle deflects. We provide an algorithm for calculating the law of motion that takes into account inertial components of the nozzle. The study we carried out should make it possible to alter the direction of the spacecraft velocity vector so as to produce a desired deviation from the preset trajectory with minimum error.

Keywords: *solid-propellant rocket engine, swivelling control nozzle, flexible joint, hydraulic steering gear, start-stop mode*

REFERENCES

- [1] Zaytsev N.N., Naberukhin D.G., Pyankov D.A. *Vestnik PNIPU. Aerokosmicheskaya tekhnika — PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2016, no. 46, pp. 108–110.
- [2] Solomonov Yu.S., Lipanov A.M., ed. *Tverdotoplivnye reguliruemye dvigatelnye ustanovki* [Throttleable solid-propellant engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2011, 416 p.
- [3] Fakhrutdinov I.Kh., Kotelnikov A.V. *Konstruktsiya i proektirovanie raketnykh dvigateley tverdogo topliva* [Design and development of solid-propellant rocket engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987, 328 p.
- [4] Volkov V.T., Yagodnikov D.A. *Issledovanie i stendovaya otrabotka raketnykh dvigateley na tverdom toplive* [Investigation and development testing of solid propellant rocket engines]. Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ., 2007, 296 p.
- [5] Lavrov L.N., Bolotov A.A., Gapanenko V.I. *Konstruktsii raketnykh dvigateley na tverdom toplive* [Designs of solid-propellant rocket engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1993, 532 p.
- [6] Mezхова M.P. *Molodezhnyy nauchno-tekhnicheskiy vestnik — Youth Scientific and Technical Bulletin of BMSTU*, 2015, no. 5. Available at: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/782286.html>
- [7] *Organy upravleniya vektorom tyagi tverdotoplivnykh raket: raschet, konstruktivnye osobennosti, eksperiment* [Thrust vector controls of solid-propellant rockets: calculation, design specifics, experiments]. Kuznetsov N.P., ed. Moscow, Izhevsk, Regular and Chaotic Dynamics Publ., 2006, 522 p.
- [8] Bondarenko A.S., Demenev D.N., Zaytsev N.N. *Vestnik PNIPU. Aerokosmicheskaya tekhnika — PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2013, no. 34, pp. 64–66.

- [9] Zhou J., Zhang J.L., Zhou F.Q. *Advanced Materials Research*, 2012, vol. 591–593, pp. 15–20.
- [10] *Konstruktsiya i otrabotka RDTT* [Design and testing of solid propellant rocket engines]. Vinitskiy A.M., ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980, 230 p.
- [11] Frolov K.V., Popov S.A., Musatov A.K. *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Theory of mechanisms and machines]. Frolov K.V., ed. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 2003, 496 p.
- [12] Timofeev G.A. *Teoriya mekhanizmov i mashin. Kurs lektsiy* [Theory of mechanisms and machines. A lecture course]. Moscow, Yurayt Publ., 2010, 351 p.
- [13] Kaptsov O.V. *Metody integrirovaniya uravneniy s chastnymi proizvodnymi* [Integration methods for partial differential equations]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2009, 182 p.
- [14] Utyashev A.R. *Tr. Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Estestvennye i inzhenernye nauki — Proc. of Bratsk State University. Natural and Engineering Sciences*, 2007, vol. 2, pp. 57–59.

Kostikov Yu.V., Cand. Sc. (Eng.), Assoc.Professor, Department of Theory of Mechanisms and Machines, Bauman Moscow State Technical University.
e-mail: kostikov.iurij@yandex.ru

Sumnitelnyy N.V., student, Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: nik4ok@gmail.com

Ryazanov R.S., student, Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: yanemal@rambler.ru