

УДК 621.182.233

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛЯТОРА РАСХОДА НА ЕГО СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Е. Н. Беляев¹, А. И. Коломенцев¹, Л. Б. Насименто², В. П. Назаров³

¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)
Российская Федерация, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4.
E-mail: kaf202@mai.ru

²Технологический институт аэронавтики
Бразилия, 12228-900, г. Сан-Жозе-дос-Кампос, пл. Маршала Эдуардо Гомеса, 50. E-mail: ips@ita.br

³Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: dla@sibsau.ru

Статья посвящена теоретическому анализу влияния геометрических и механических параметров регуляторов расхода прямого действия, применяемых в ЖРД, на их статические и динамические характеристики. Исследование проведено с помощью математической модели в сосредоточенных параметрах. Показано, что расширению области по перепаду давления на регуляторе расхода, в которой регулятор обладает положительным статизмом, способствует треугольная форма золотниковых отверстий, что особенно важно для многорежимных ЖРД. При такой форме золотниковых отверстий гидродинамическая сила, зависящая от величины расхода и перепада давления на этих отверстиях, толщины кромки золотника, оказывает меньшее влияние на статизм регулятора. Динамические свойства регулятора расхода, установленного в технической системе, во многом определяются площадями золотника и демпфирующих отверстий.

Ключевые слова: регулятор, статизм, гидродинамическая сила, золотник.

INFLUENCE OF DESIGN PARAMETERS OF A FLOW REGULATOR ON ITS STATIC AND DYNAMIC CHARACTERISTICS

E. N. Beliaev¹, A. I. Kolomentsev¹, L. B. Nascimento², V. P. Nasarov³

¹Moscow Aviation Institute (national research university)
4, Volokolamskoe sh., Moscow, 125993, Russian Federation
E-mail: kaf202@mai.ru

²Technological Institute of Aeronautics
50, Marechal Eduardo Gomes sq., Sao Jose dos Campos, 12228-900, Brazil
E-mail: ips@ita.br

³Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation, E-mail: dla@sibsau.ru

This article is dedicated to a theoretical analysis of the influence of geometrical and mechanical parameters of the direct action flow regulator used in LRE on its static and dynamic characteristics. The investigation was conducted using a lumped-parameter mathematical model. It was showed, that the region dependently of the pressure drop in flow regulator, which the static characteristic is positive, is expanded when using the triangular geometry for the orifices of regulation, which is very important, specially, for multi-regimes LRE. For this geometric form orifice, the hydraulic force, which depends of the flow rate and the pressure drop in these orifices, and the thickness of the slide valve, have less influence in the positive behavior of the static characteristic of the regulator. The dynamic characteristics of the flow regulator, calculated in the technical system, are widely defined by the area of the piston and the area of the damping orifices.

Keywords: regulator, static characteristic, hydraulic force, slide valve.

Регуляторы расхода, применяемые в ЖРД, разделяются на регуляторы прямого и непрямого действия. В современных ЖРД широкое применение нашли регуляторы расхода прямого действия. Они используются для поддержания, как в двигателях РД253 и РД120, или для контролируемого изменения расхода, как в двигателях РД170, РД180, РД191, в каналах управления их тягой. В некоторых случаях они ис-

пользуются как стабилизаторы расхода. Так, в двигателе РД301 установлены два регулятора, один из них – в канале управления тягой, а второй выполняет функции стабилизатора расхода. Он установлен в магистрали на входе в тракт охлаждения камеры сгорания (КС) и после запуска двигателя вследствие прогрева компонента топлива в рубашке охлаждения КС происходит увеличение гидравлических потерь давления

в ней. По мере их увеличения происходит перераспределение перепада давления между регулятором расхода и трактом охлаждения КС, и таким образом происходит сохранение необходимой величины расхода компонента топлива для охлаждения КС.

Исследованию работы регуляторов расхода посвящено немного работ, среди них следует выделить работы [1–6]. В этих работах приводятся общие данные по регуляторам прямого действия, рассматриваются их статические и динамические характеристики, приводятся основные уравнения, описывающие динамику работы регуляторов, но в них не показано влияние основных конструктивных параметров на статические и динамические характеристики регуляторов. В данной статье на примере малорасходного регулятора представлено влияние основных конструктивных параметров на его статические и динамические характеристики.

На рис. 1 приведена схема регулятора прямого действия, а на рис. 2 и 3 приведены его статические характеристики. Основные конструктивные характеристики этого регулятора расхода следующие:

- площадь золотника $5,0 \text{ см}^2$;
- жесткость пружины $20,0 \text{ кг/см}$;
- площадь демпфирующих отверстий $0,0353 \text{ см}^2$;
- форма золотниковых отверстий треугольник ;
- толщина кромки золотника $0,06 \text{ см}$.

Номинальная величина расхода через регулятор составляет $\sim 0,6 \text{ кг/с}$ при перепаде давления на нём $2,5 \text{ МПа}$.

Современные ЖРД, как правило, многорежимные, поэтому очень важно, чтобы регулятор расхода обладал статическими и динамическими характеристиками, обеспечивающими устойчивую работу двигателя в широком диапазоне изменения его параметров с заданной точностью.

Система уравнений, описывающая работу регулятора расхода, достаточно подробно изложена в [1–3; 5]. При исследовании влияния геометрических параметров регулятора расхода на его статические и динамические характеристики использована математическая модель, изложенная в [1].

Основным уравнением регулятора расхода, описывающим его работу, является уравнение перемещения золотника, которое записывается в следующем виде:

$$m_{\text{пр}} \cdot d^2 h / dt^2 + R_{\text{пр}} \cdot dh / dt + K_{\text{пру}} \cdot h = F_1(p_1 - p_2) - P_{\text{пру}} + P_{\text{гд}}, \quad (1)$$

где $m_{\text{пр}}$ – приведенная масса; $R_{\text{пр}}$ – приведенный коэффициент трения; $K_{\text{пру}}$ – жесткость пружины; F_1 – площадь золотника; $P_{\text{пру}}$ – усилие предварительного натяжения пружины; $P_{\text{гд}}$ – гидродинамическая сила; p_1 – давление на входе регулятора; p_2 – давление внутри регулятора; h – ход золотника.

Это уравнение устанавливает баланс сил, действующих на золотник. Из этого уравнения следует, что наряду с влиянием площади золотника, жесткости пружины, приведенных перемещаемой массы и коэффициента трения, определенный вклад в баланс сил вносит гидродинамическая сила. Эта сила связана с падением давления в золотниковых отверстиях ни-

же, чем давление во внутренней полости регулятора p_2 . В результате чего появляется сила (названная гидродинамической), направленная в сторону закрытия золотниковых отверстий.

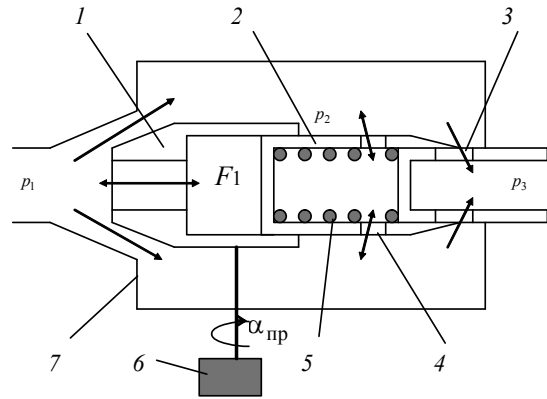


Рис. 1. Схема регулятора расхода:
1 – дроссель регулятора; 2 – золотник; 3 – перекрываемые золотником отверстия; 4 – демпфирующие отверстия; 5 – пружина; 6 – привод дросселя; 7 – корпус; p_1 – давление на входе регулятора; p_2 – давление внутри регулятора; p_3 – давление на выходе регулятора; F_1 – площадь золотника; $\alpha_{\text{пр}}$ – угол привода дросселя

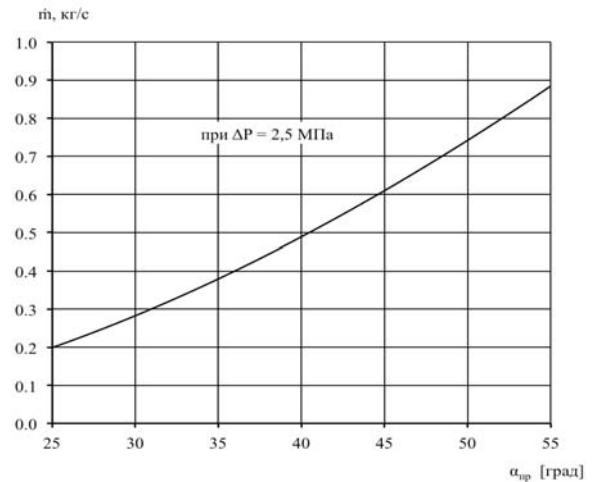


Рис. 2. Настроенная характеристика

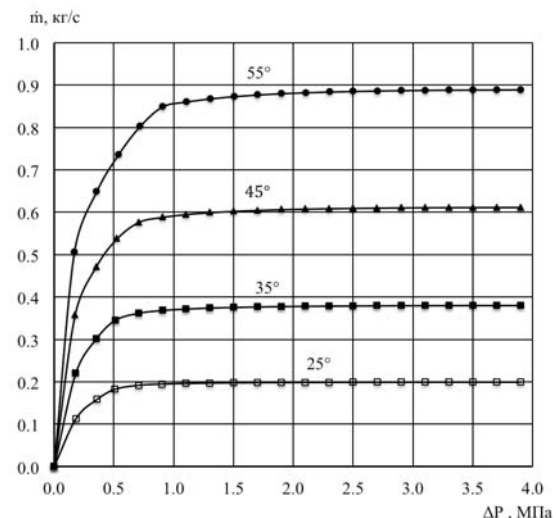


Рис. 3. Нагрузочная характеристика

На рис. 4 приведено изменение проходной площади золотниковых отверстий ($F_{\text{зол}}$) от перемещения золотника при различной форме отверстий. Суммарная проходная площадь золотниковых отверстий и ход золотника для всех форм одинаков.

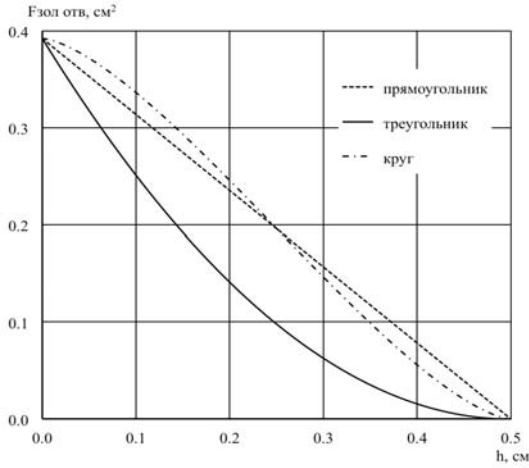


Рис. 4. Зависимость площади золотниковых отверстий от перемещения золотника при их различной форме

Нагрузочная характеристика регулятора расхода при разных формах золотниковых отверстий представлена на рис. 5. Расход через регулятор на этом рисунке приведен в разных масштабах (\dot{m}_1 от 0,595 до 0,62 кг/с, а \dot{m}_2 от 0 до 0,7 кг/с) для сравнения и детального рассмотрения нагрузочной характеристики, так как при гидравлических испытаниях регулятора сложно, а чаще и невозможно обеспечить необходимую точность экспериментального определения расхода для таких малорасходных регуляторов.

На рис. 5 видно, что при треугольной форме золотниковых отверстий диапазон перепада давления, в котором нагрузочная характеристика имеет положительный статизм, значительно шире по сравнению с круглыми и прямоугольными отверстиями. Как известно, наличие отрицательного статизма, когда с увеличением перепада давления на регуляторе расход через него уменьшается, может быть причиной неустойчивой работы двигателя [3].

Поэтому на всех последних современных ЖРД при проектировании регуляторов расхода выбирают форму золотниковых отверстий треугольную.

На рис. 6 приведена нагрузочная характеристика регулятора расхода и зависимость гидродинамической силы, действующей на кромку золотника при различной её толщине. На этом рисунке видно, что с уменьшением толщины кромки золотника расширяется диапазон перепада давления, в котором статизм регулятора положителен, что напрямую связано с величиной гидродинамической силы.

Величина этой силы зависит от толщины кромки золотника, перепада давления на золотниковых отверстиях и расхода компонента через регулятор. Два последних обстоятельства характеризуют величину скорости потока в золотниковых отверстиях, а следова-

тельно, и разницу между давлением внутри регулятора p_2 и давлением, действующим на кромку золотника.

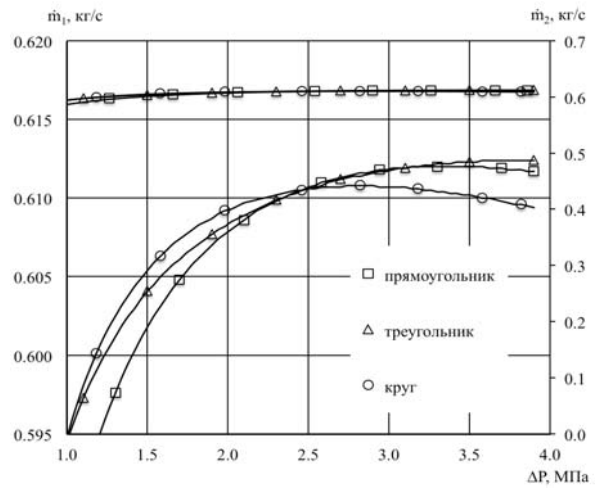


Рис. 5. Нагрузочная характеристика регулятора при различных формах золотниковых отверстий

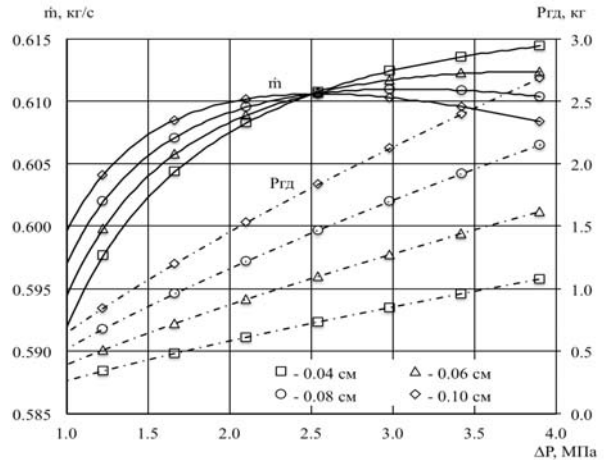


Рис. 6. Нагрузочная характеристика регулятора и зависимость гидродинамической силы при разной толщине кромки золотника

Чаще всего отрицательный статизм у регулятора расхода проявляется при одновременной реализации большого перепада давления на регуляторе в сочетании с большим расходом компонента топлива через регулятор (правый верхний угол на нагрузочной характеристике регулятора, рис. 3).

При небольших перепадах давления на золотниковых отверстиях кромка самого золотника, перекрывающего эти отверстия, может быть выполнена очень тонкой. Толщина кромки лимитируется её прочностными свойствами.

На рис. 7 приведена нагрузочная характеристика регулятора расхода при различной площади золотника. Из этого рисунка видно, что с увеличением площади золотника диапазон перепада давления, в котором нагрузочная характеристика приближается к горизонтальной, расширяется. Следует отметить, что с увеличением площади золотника увеличиваются габариты регулятора и его масса.

На рис. 8 приведена нагрузочная характеристика регулятора расхода при различной жесткости пружины.

Жесткость пружина довольно сильно влияет на нагрузочную характеристику регулятора. При меньшей жесткости пружины регулятор начинает поддерживать расход с меньшего перепада давления на нём, нагрузочная характеристика приближается к горизонтальной, но при этом появляется отрицательный статизм.

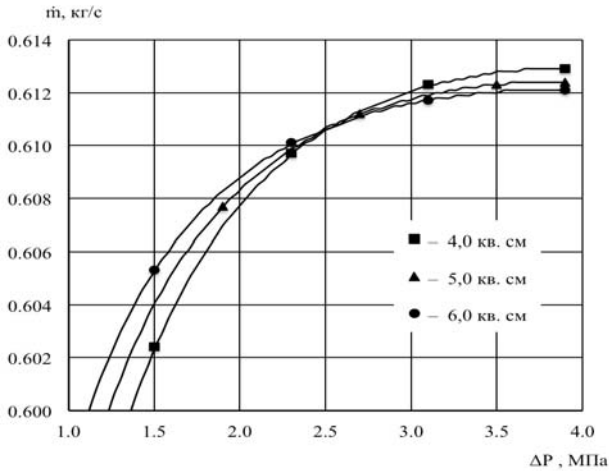


Рис. 7. Нагрузочная характеристика регулятора расхода при различной площади золотника

В динамике регулятор расхода может поддерживать заданную величину расхода при относительно медленных возмущениях давления как на входе, так и на его выходе. В качестве критерия, характеризующего динамические свойства регулятора расхода, можно рассматривать отношение величины приращения давления на выходе из регулятора к величине приращения возмущающего воздействия давления на его входе (коэффициент усиления регулятора расхода). При проведении исследований на входе в регулятор расхода задавались синусоидальные колебания давления с различными частотами и амплитудой 0,1 МПа.

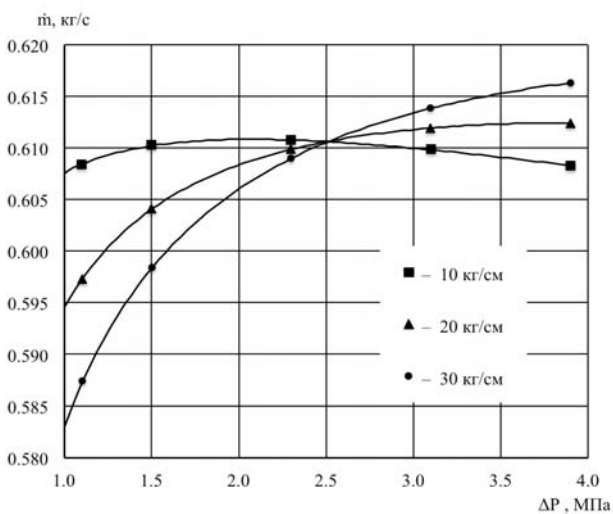


Рис. 8. Нагрузочная характеристика регулятора расхода при разной жесткости пружины

В данной статье приведены результаты исследования динамики регулятора в области частот от 0 до 20 Гц, так как система уравнений с сосредоточенными параметрами, которая использовалась при проведении исследований, не позволяет проанализировать более высокую область частот [2; 6].

На рис. 9 показано изменение коэффициента усиления регулятора при введении синусоидальных возмущений различной частоты на его входе при разной площади золотника.

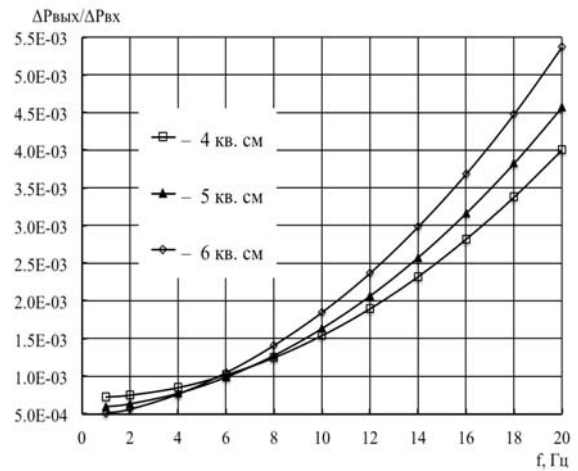


Рис. 9. Влияние площади золотника на коэффициент усиления регулятора расхода

Площадь золотника достаточно сильно влияет на коэффициент усиления регулятора расхода, так как при увеличении площади золотника возрастает сила, воздействующая на золотник, направленная на перемещение золотника в новое положение, которое обеспечивает стабилизацию расхода на исходном уровне. Вместе с тем увеличение площади золотника приводит к увеличению приведенных перемещаемой массы и коэффициента трения [3], а это, в свою очередь, снижает быстродействие регулятора.

На рис. 10 приведено влияние площади демпфирующих отверстий на коэффициент усиления регулятора расхода на разных частотах.

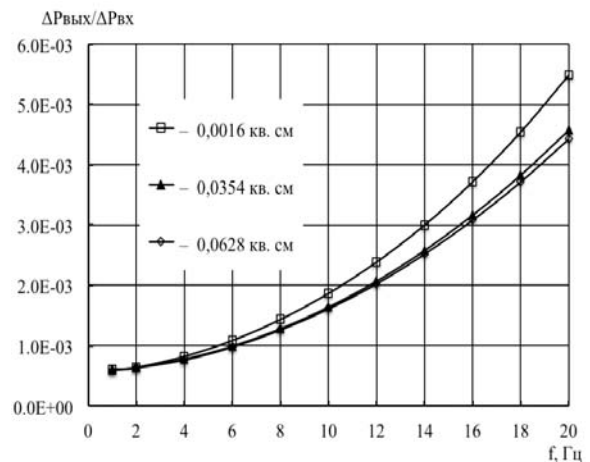


Рис. 10. Влияние площади демпфирующих отверстий на коэффициент усиления регулятора

Само название этих отверстий говорит о их роли в регуляторе. На статические характеристики регулятора эти отверстия влияния не оказывают. Они влияют на скорость перемещения золотника при возникновении возмущений, и при их определённой величине они выполняют стабилизирующую роль в динамике поддержания расхода в системе, в которой установлен регулятор расхода.

На представленном рисунке видно, что если площадь демпфирующих отверстий очень маленькая, то золотник перемещается медленно (гидравлический катаракт) и не успевает в полной мере парировать входящие возмущения. В то же время, начиная с определённой площади демпфирующих отверстий, их эффективность уменьшается.

Следует отметить, что при уменьшении площади демпфирующих отверстий возрастают приведенные перемещаемая масса и коэффициент трения, которые, так же как и увеличение площади золотника, приводят к уменьшению быстродействия регулятора расхода.

Проведенными исследованиями показано, что получение нагрузочной характеристики регулятора расхода с положительным статизмом в области заданного рабочего перепада давлений возможно при определенном сочетании его основных конструктивных параметров.

Впервые подтверждено теоретически, что расширению области по перепаду давления, в которой статизм регулятора будет положительным, способствует треугольная форма золотниковых отверстий. Это позволяет ЖРД работать в более широком диапазоне изменения их тяги.

Динамические свойства регулятора расхода, установленного в технической системе, во многом определяются соотношением между площадью золотника и площадью его демпфирующих отверстий.

Библиографические ссылки

1. Беляев Е. Н., Черваков В. В. Математическое моделирование ЖРД. М. : Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2009. 280 с.
2. Беляев Е. Н., Чванов В. К., Черваков В. В. Математическое моделирование рабочего процесса жид-

костных ракетных двигателей : учебник / под ред. В. К. Чванова. М. : Изд-во МАИ, 1999. 228 с.

3. Гликман Б. Ф. Автоматическое регулирование жидкостных ракетных двигателей. М. : Машиностроение, 1974. 396 с.

4. Зенин Е. С., Меньшикова О. М., Федотчев В. А. Математическое моделирование регуляторов ЖРД // Полет. 2013. № 5. С. 20–24.

5. Е. В. Лебединский [и др.]. Компьютерные модели жидкостных ракетных двигателей. М. : Машиностроение, 2009. 375 с.

6. Шевяков А. А. [и др.]. Автоматическое управление ракетными двигателями. М. : Машиностроение, 1978. 290 с.

References

1. Belyaev E. N., Chervakov V. V. *Matematicheskoe modelirovanie ZhRD* (Mathematical modeling of LPRE). Moscow, MAI-PRINT Publ., 2009, 280 p.

2. Belyaev E. N., Chvanov V. K., Chervakov V. V. *Matematicheskoe modelirovanie rabocheho processa zhidkostnyh raketnyh dvigatej* (Mathematical modeling of the work process in liquid-propellant rocket engine), edited V. K. Chvanova. Moscow, MAI Publ., 1999, 228 p.

3. Glikman B. F. *Avtomaticheskoe regulirovanie zhidkostnyh raketnyh dvigatelej* (Automatic regulation of liquid-propellant rocket engine). Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974, 396 p.

4. Zenin E. S., Men'shikova O. M., Fedotchev V. A. [Mathematical model of regulators of LPRE]. *Polet*. 2013, no. 5, p. 20–24.

5. Lebedinsky E. V., Mosolov S. V., Kalmykov G. P. et al. *Komp'yuternye modeli zhidkostnyh raketnyh dvigatelej* (Computer models of liquid-propellant rocket engine). Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009, 375 p.

6. Sheviakov A. A., Kalnin V. M., Naumenkova N. V. et al. *Avtomaticheskoe upravlenie raketnymi dvigatejami* (Automatic control of rocket engines). Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978, 290 p.

© Беляев Е. Н., Коломенцев А. И.,
Насименто Л. Б., Назаров В. П., 2014