

Научная статья

УДК 621.45.015.2

URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=177620>

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РЕГУЛЯТОРА РАСХОДА НА УСТОЙЧИВОСТЬ РАБОТЫ ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

**Иван Владимирович Бурцев**

НПО «Энергомаш им. академика В.П. Глушко»,

Химки, Россия

[burtsev37@gmail.com](mailto:burtsev37@gmail.com)

**Аннотация.** Рассмотрены особенности функционирования регулятора расхода при наличии трения в его подвижных элементах. Описано влияние на нагрузочную характеристику запаздывания перемещения подвижных элементов стабилизатора регулятора расхода при изменении перепада давления на нем. Проведен расчетный анализ влияния характеристик переходного процесса изменения расхода через регулятор на колебания температуры генераторного газа и частоту вращения вала турбонасосного агрегата (ТНА) в жидкостном ракетном двигателе (ЖРД), выполненном по схеме с дожиганием генераторного газа. Рассмотрен механизм возникновения автоколебаний в ЖРД в зависимости от вида нагрузочной характеристики регулятора при ступенчатом возмущении перепада давления на нем. Описана последовательность изменения параметров, приводящая к возникновению автоколебаний в трактах ЖРД.

**Ключевые слова:** устойчивость работы ЖРД по линии регулятора расхода, автоколебания компонентов топлива в трактах агрегатов подачи ЖРД, работа регулятора расхода с запаздыванием работы стабилизатора, нагрузочная характеристика регулятора расхода с существенными нелинейностями, трение в элементах регулятора

**Для цитирования:** Бурцев И.В. Оценка влияния регулятора расхода на устойчивость работы жидкостного ракетного двигателя // Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30. № 4. С. 195–201. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=177620>

Original article

## THRUST CONTROL VALVE EFFECT ASSESSMENT ON THE LIQUID PROPELLANT ROCKET ENGINE OPERATION

**Ivan V. Burtsev**

NPO “Energomash named after academician V.P. Glushko”,

Khimki, Russia

[burtsev37@gmail.com](mailto:burtsev37@gmail.com)

### **Abstract**

The subject of the study is a staged combustion cycle liquid propellant rocket engine (LRE). The purpose of the study consists in determining the thrust control valve characteristics effect on the LRE stability.

The article presents the description of the thrust control valve operation, consisting of a throttle and stabilizing parts.

The author defined the main specifics while the thrust control valve functioning, and noted that with the change in the pressure drop on the regulator a delay in the movement of the stabilizer spool is possible due to the friction forces between the movable elements of the stabilizing part of the regulator.

The external view of the loading curve in the presence of a delay in the movement of the thrust control valve stabilizer spool is described, and the main parameters characterizing the loading curve specifics are highlighted.

© Бурцев И.В., 2023

Computations of the LRE parameters changes in the cases of various thrust control valve loading curves were conducted. Evaluation of the flow rate through the regulator change transient impact on the generator gas temperature and turbo-pump unit shaft rotation speed of the LRE being considered fluctuations was performed.

The author proposed the description of the self-oscillations origination mechanism in the LRE paths at the abrupt change of the pressure drop on the flow regulator in the case of the various types of loading curve of the flow regulator.

The article demonstrates the loading curves specifics effect on the of self-oscillations parameters.

Assumptions were made on the self-oscillations frequency effect depending on the engine operating mode, since the residence time of the components in the preburner changes.

A sequence of changes in the parameters of the components in the paths of the liquid propellant supply units at an abrupt change in the pressure drop on the regulator has been compiled.

**Keywords:** liquid propellant rocket engine operation stability along the line of flow control valve (TCV), components self-oscillation in the paths of the LRE feed units, TCV operation with the stabilizer operation delay, TCV loading characteristic with substantial nonlinearities, friction in the TCV elements

**For citation:** Burtsev I.V. Thrust Control Valve Effect Assessment on the Liquid Propellant Rocket Engine Operation. *Aerospace MAI Journal*, 2023, vol. 30, no. 4, pp. 195–201. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=177620>

## Введение

Управление тягой маршевых ЖРД, выполненных по схеме с дожиганием генераторного газа, обычно осуществляется регулятором расхода, содержащим дроссель и стабилизатор, обеспечивающим требуемый расход одного из компонентов топлива в газогенератор. Данный способ регулирования уровня тяги используется для управления современными отечественными и зарубежными многорежимными ЖРД, например РД180, RL-10, Merlin [1–4]. В процессе функционирования регулятора расхода в составе ЖРД возможно возникновение неустойчивости. В публикациях [5–7] исследованы причины возникновения неустойчивости в предположении отсутствия существенных нелинейностей характеристик регулятора, таких как сухое трение между подвижными элементами регулятора.

Однако из-за конструктивных особенностей при ступенчатом возмущении перепада давления на регуляторе действующие на подвижные элементы регулятора силы трения могут вызвать запаздывание в работе регулятора. Это может вызвать переходной процесс изменения расхода, т. е. отклонение от прямолинейного участка исходной нагрузочной характеристики, представляющей собой зависимость расхода через регулятор от перепада давления и получаемой при постоянном положении дроссельной части регулятора на автономных испытаниях. Данное явление описывается в [8].

Прямым следствием такого переходного процесса изменения расхода является возникновение взаимосвязанного с ним переходного процесса в перемещении золотника, который, в свою очередь, также воздействует на переходный процесс изменения расхода. Все это может рассматриваться как механизм, порождающий автоколебания в контуре

«регулятор–турбина», которые охватывают ЖРД в целом [9, 10].

В данной статье на основании [8] и проведенных расчетов типового ЖРД представлен анализ влияния характеристики регулятора расхода с нелинейностями на устойчивость и описан возможный механизм возникновения автоколебаний в контуре ЖРД.

## Особенности работы регулятора расхода

Рассмотрим регулятор расхода, схема конструкции которого представлена на рис. 1. Управление расходом через регулятор осуществляется в дроссельной части посредством жесткой связи валика 1 и гильзы 2, которая, перемещаясь, перекрывает дросселирующие окна в направляющей 3, располагающейся в корпусе 7. Расход через регулятор задается положением валика, который жестко соединен с приводом. После прохождения дросселирующих окон поток направляется в стабилизирующую часть регулятора, состоящую из гильзы (золотника) 4, которая перекрывает регулирующие окна в направляющей 6. Положение золотника определяется балансом сил сжатия пружины 5 и сил, действующих на торцевые поверхности золотника 4 от перепада давления.

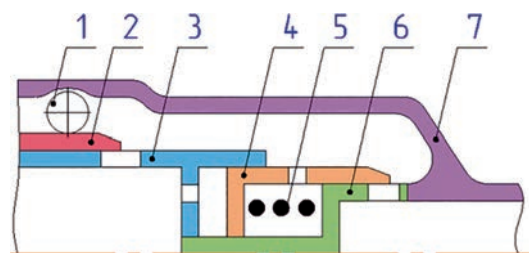


Рис. 1. Схема регулятора расхода

При увеличении давления на входе в регулятор увеличивается сила, действующая на левый торец золотника, следовательно, он смещается вправо, и проходная площадь регулирующих окон в направляющей перекрывается так, что исходный расход сохраняется. При снижении давления перед регулятором золотник стабилизатора смещается влево, открывая регулирующие окна. Таким образом обеспечивается парирование возмущений и поддерживается постоянный расход регулятором.

Если детали стабилизатора двигаются с перекосом или на движение золотника оказывают влияние силы трения различных видов: сухого трения, трения покоя, вязкого трения, то золотник стабилизатора может перемещаться с запаздыванием [11, 12].

Например, при снижении перепада давления эффект запаздывания приводит к возникновению переходного процесса изменения расхода через регулятор, отражаемого в нагрузочной характеристике (рис. 2, участок 1–3). При дальнейшем снижении перепада давления этот расход поддерживается в соответствии с нагрузочной характеристикой на участке 4–4' и восстанавливается либо при увеличении перепада давления на регуляторе, либо при сохранении постоянного перепада на регуляторе в течение некоторого времени. При этом восстановление расхода может произойти в любом месте участка 1–2 и определяется характером изменения перепада давления на регуляторе. Таким образом, при изменении перепада давления в процессе регулирования может происходить циклическое изменение расхода через регулятор по контуру 2–4–4'–2'.

В этом случае переходный процесс изменения расхода можно, для простоты понимания, представить двумя параметрами:  $\Delta m$  – изменением расхода и  $\alpha$  – углом наклона характеристики, определяющим скорость изменения расхода на переходном участке

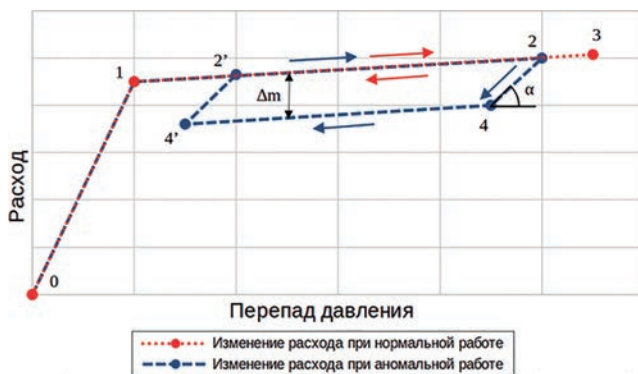


Рис. 2. Изменение расхода через регулятор в переходном процессе из-за запаздывания перемещения золотника при возмущении перепада давления

2–4. Понятно, что возникающие в этом процессе колебания расхода являются возмущениями процесса горения в газогенераторе, а следовательно, работы турбины турбонасосного агрегата (ТНА).

Рассмотрим ЖРД, выполненный по схеме с дожиганием окислительного генераторного газа [13, 14]. Структурно-функциональная схема такого ЖРД представлена на рис. 3. ЖРД состоит из ТНА, который включает в себя насос окислителя, две ступени насоса горючего и турбину. Горючее из второй ступени насоса и весь окислитель подаются в газогенератор, где газифицируются и приводят во вращение турбину основного ТНА, а далее поступают в камеру сгорания, где смешиваются с оставшейся частью горючего, и получившиеся продукты сгорания истекают из сопла. Перед основными насосами установлены бустерные насосы. По линии окислителя привод бустерного насоса осуществляется генераторным газом, отобранном после турбины основного ТНА, а бустерный насос горючего приводится во вращение горючим, отобранном частично с выхода из первой ступени насоса. Для данной схемы создана математическая модель, описывающая функционирование агрегатов ЖРД, с учетом запаздывания при изменении параметров [15–18].

В данной схеме возможно возникновение неустойчивости и по другим причинам, которые описаны в [19, 20], но не рассматриваются в данной статье.

Для анализа влияния характеристик регулятора на устойчивость ЖРД предположим, что на стационарном режиме его работы происходит ступенчатое изменение перепада давления на регуляторе. При этом в двигателе могут возникнуть переходные процессы, характер которых (затухание, нарастание, автоколебания) определяет устойчивость его функционирования. В рассматриваемом случае, перепад давления на регуляторе будет изменяться в некоторой окрестности значения, реализованного на стационарном режиме.

Рассмотрим три варианта изменения (характеристик) расхода через регулятор (рис. 4) на участках 2–4 и 2'–4' (см. рис. 2).

Характеристика 1 описывает идеальный регулятор, сохраняющий постоянный расход при перепаде давления в некоторой окрестности стационарного значения без запаздывания перемещения золотника. Характеристики 2 и 3 представляют собой частный случай характеристики при разной скорости изменения расхода и для корректности проведения расчетов представлены функцией гиперболического тангенса, обеспечивающей неразрывность производной в любой точке. Основное различие между ними – это значение  $\Delta m$  – ампли-

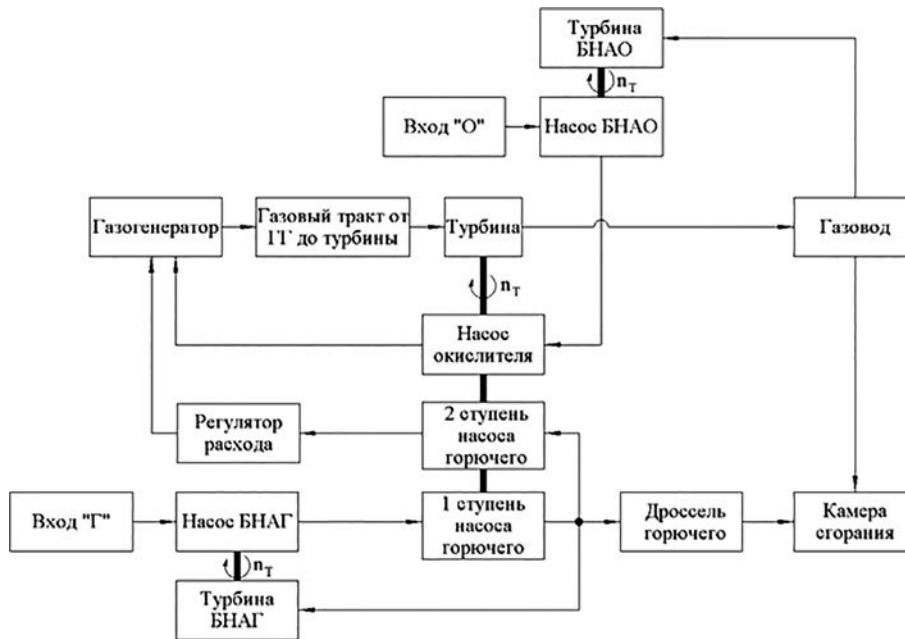


Рис. 3. Структурно-функциональная схема ЖРД

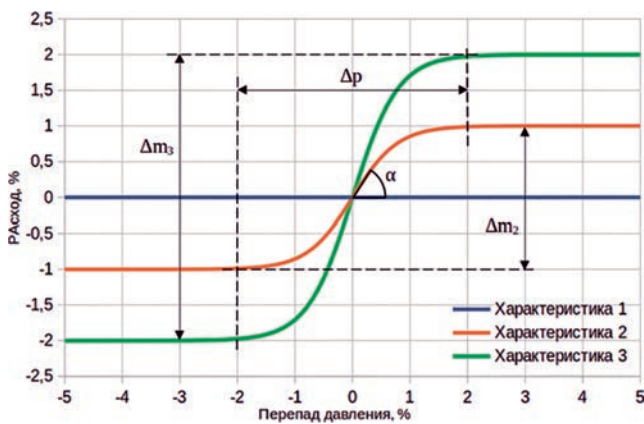


Рис. 4. Аппроксимация изменения расхода на участке 2–4

туды расхода – и углом наклона  $\alpha$ , определяющего скорость изменения расхода.

Расчеты параметров двигателя при ступенчатом возмущении перепада давления на регуляторе выполнены для вышеприведенных характеристик переходных процессов.

На рис. 5 приведены графики изменения частоты вращения вала ТНА и температуры генераторного газа в процентах от значений на стационарном режиме. Предполагается, что в начальный момент времени происходит ступенчатое изменение перепада давления на регуляторе, вызванное кратковременным ростом мощности насоса горючего.

Отметим, что для характеристики 1 колебания рассматриваемых параметров ЖРД носят затухающий характер. Для характеристики 2 колебания имеют постоянную амплитуду, а для характери-

стики 3 амплитуда колебаний увеличивается со временем.

По результатам серии расчетов с различными характеристиками переходных процессов расхода через регулятор выявлены следующие закономерности.

1. На процесс затухания колебаний параметров ЖРД оказывает влияние скорость изменения рас-

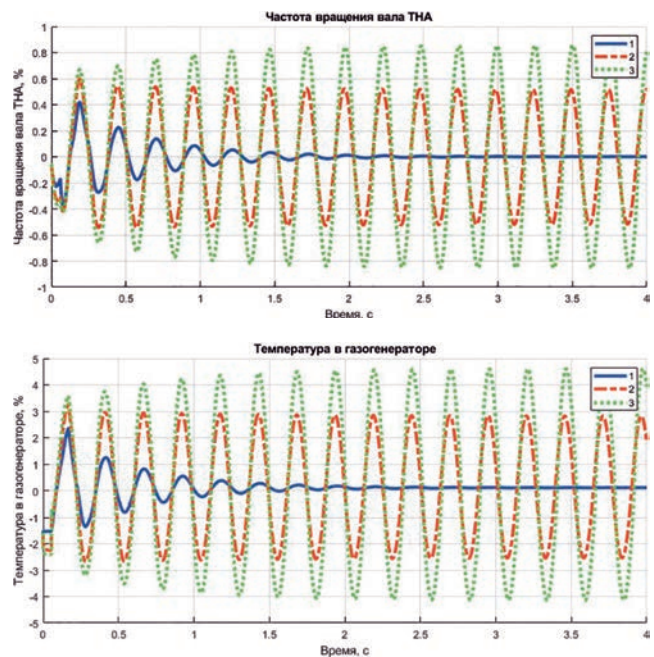


Рис. 5. Переходные процессы изменения частоты вращения вала ТНА и в температуре генераторного газа при различных характеристиках переходных процессов изменения расхода через регулятор

хода при запаздывании перемещения золотника. При нарастании возмущения перепада давления на регуляторе эти колебания могут перерасти в незатухающие.

2. Отклонение расхода через регулятор ( $\Delta m$ ) оказывает влияние на амплитуду колебаний: чем больше величина  $\Delta m$ , тем больше амплитуда колебаний. Это можно объяснить большей амплитудой колебаний соотношения компонентов ( $K_m$ ) топлива в газогенераторе и, как следствие, большей амплитудой колебаний частоты вращения вала ТНА.

Соотношения между вышеописанными параметрами и их действительные значения зависят от конкретного экземпляра ЖРД и режима его работы.

### Обсуждение полученных результатов

Опишем последовательность изменения параметров ЖРД при возникновении автоколебаний, порождаемых скачкообразным изменением  $K_m$  в газогенераторе, вызванным запаздыванием изменения расхода через регулятор (рис. 6).

Можно предложить следующую последовательность развития автоколебаний в ЖРД:

- исх. — работа двигателя на режимах глубокого дросселирования с номинальным значением  $K_m$ ;
- 0 — изменение  $K_m$  в сторону уменьшения значения:

- о резкое снижение перепада давления на регуляторе при переходе на нижнюю ветвь напорной характеристики и снижение расхода горючего в газогенератор;

- о снижение температуры в газогенераторе (снижение расхода горючего при практически постоянном расходе окислителя);

- о частота вращения пока не меняется, так как генераторный газ пока не дошел до турбины;

- 1 — газ с меньшей температурой доходит до турбины:

- о начало падения частоты вращения вала ТНА;

- о перепад на регуляторе немного снижается, но расход остается постоянным;

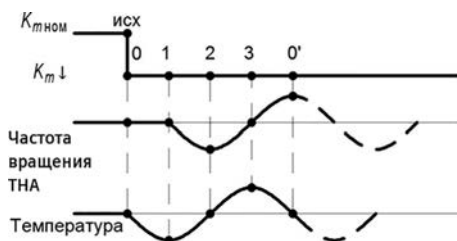


Рис. 6. Переходные процессы изменения частоты вращения вала ТНА и в температуре генераторного газа при различных характеристиках переходных процессов изменения расхода через регулятор

- о рост температуры в газогенераторе (частота вращения вала снижается, расход окислителя снижается,  $K_m$  снижается);

- 2 — газ с увеличенной температурой доходит до турбины:

- о увеличение частоты вращения вала ТНА;

- о увеличение перепада давления на регуляторе, резкий переход на верхнюю ветвь напорной характеристики и увеличение расхода горючего через газогенератор;

- о небольшой рост расхода окислителя из-за роста частоты вращения вала ТНА;

- о рост температуры в газогенераторе, так как рост расхода горючего существенно больше роста расхода окислителя;

- 3 — газ с еще большей температурой доходит до турбины:

- о дальнейший рост частоты вращения вала ТНА;

- о рост перепада давления на регуляторе, но расход остается постоянным, так как рабочая точка остается на верхней кривой нагрузочной характеристики;

- о увеличение расхода окислителя из-за роста частоты вращения вала ТНА;

- о снижение температуры в газогенераторе из-за увеличения  $K_m$ ;

- 0' — газ с пониженной температурой доходит до турбины:

- о падение частоты вращения вала ТНА из-за снижения температуры генераторного газа;

- о повторение цикла;

В рассматриваемом случае четверть периода колебаний будет, в основном, определяться как время, за которое компоненты топлива проходят от входа в насосы до выхода в турбину.

Учитывая зависимость частоты автоколебаний от температуры генераторного газа, можно предположить, что частота автоколебаний будет меняться в зависимости от режима работы двигателя, так как изменяется время пребывания компонентов в газогенераторе.

### Выводы

1. Рассмотрены особенности переходного процесса изменения расхода через регулятор при запаздывании перемещения золотника.

2. Продемонстрировано влияние характеристик переходного процесса изменения расхода через регулятор на устойчивость ЖРД, а именно:

- при увеличении изменения расхода через регулятор амплитуда колебаний частоты вращения вала ТНА и температуры генераторного газа увеличивается;

- скорость изменения расхода через регулятор является триггером возникновения автоколебаний в ЖРД.

## Список источников

1. Каменский С.С., Мартиросов Д.С., Коломенцев А.И. Применение методов теории подобия для анализа стационарных рабочих процессов жидкостных ракетных двигателей // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 1. С. 32–37.
2. Casiano M., Hulka J., Yang V. Liquid-propellant rocket engine throttling: A comprehensive review // 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion
3. Huzel D.K., Huang D.H. Design of liquid propellant rocket engines. - NASA SP-125, 1967. Washington, D.C. - 469 p. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19710019929/downloads/19710019929.pdf>
4. Yao Z., Qi Y., Bao W., Zang T. Thrust Control Method and Technology of Variable-Thrust Liquid Engine for Reusable Launch Rocket // Aerospace. 2023. Vol. 10. No. 1: 32. DOI: 10.3390/aerospace10010032
5. Беляев Е.Н., Коломенцев А.И., Насименто Л.Б., Назаров В.П. Влияние конструктивных параметров регулятора расхода на его статические характеристики // Вестник СибГАУ. 2014. № 1(53). С. 109–113.
6. Гимадиев А.Г. Выбор параметров, расчет статических и динамических характеристик регулятора расхода топлива: Учебное пособие. – Самара: Изд-во СГАУ, 2007. – 63 с.
7. Захаров Н.Д. Автоколебания в системе подачи жидкости с регулятором расхода прямого действия // Динамика насосных систем: Сборник научных трудов. Киев: Наукова думка, 1980. С. 14–21.
8. Гликман Б.Ф. Автоматическое регулирование жидкостных ракетных двигателей. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1989. – 296 с.
9. Бабкин А.И., Белов С.И., Рutowский Н.Б., Соловьев Е.В. Основы теории автоматического управления ракетными двигательными установками: Учебник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 452 с.
10. Ильин М.М., Колесников К.С., Саратов Ю.С. Теория колебаний: Учебник. – 2-е изд. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 272 с.
11. Аунг К.М., Коломенцев А.И., Мартиросов Д.С. Математическое моделирование регулятора расхода жидкостного ракетного двигателя во временной и частотной областях // Вестник Московского авиационного института. 2021. Т. 28. № 1. С. 96–106. DOI: 10.34759/vst-2021-1-96-106
12. Бурцев И.В. Исследование зависимости автоколебаний в ЖРД при глубоком дросселировании от характеристик системы подачи // Труды НПО Энергомаш им. академика В.П. Глушко. 2022. № S38–39. С. 111–123.
13. Беляев Е.Н., Чванов В.К., Черваков В.В. Математическое моделирование рабочего процесса жидкостных ракетных двигателей: Учебник. / Под ред. В.К. Чванова – М.: Изд-во МАИ, 1999. – 224 с.
14. Бурцев И.В., Левочкин П.С., Мартиросов Д.С., Шильнов М.А. Механизмы возникновения автоколебаний в ЖРД // Труды НПО Энергомаш им. академика В.П. Глушко. 2022. № S38–39. С. 103–110.
15. Гимадиев А.Г. Автоматика и регулирование двигательных установок ракетных и космических систем: Электронное учебное пособие. – Самара: СГАУ, 2010. – 201 с.
16. Гимадиев А.Г., Быстров Н.Д., Сафин А.И. Расчет регулятора расхода компонента топлива ЖРД: Учебное пособие – Самара: Изд-во Самарского университета, 2020. – 72 с.
17. Зенин Е.С., Меньшикова О.М., Федотчев В.А. Математическое моделирование регуляторов ЖРД // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2013. № 5. С. 20–24.
18. Лебединский Е.В., Зайцев Б.В., Соболев А.А. Многоуровневое математическое моделирование регулятора расхода для ЖРД // Сайт ГИЦ ФГУП «Центр Келдыша». 2011. URL: <http://www.kerc.msk.ru/ipg/papers/model2.pdf>
19. Кошелев И.М., Мартиросов Д.С., Колбасенков А.И. Влияние конденсации высокотемпературного окислительного газа в зоне криогенного кислорода на низкочастотную устойчивость ЖРД // Двигатель. 2012. № 6(84). С. 24–27. URL: <http://engine.aviaport.ru/issues/84/pics/pg24.pdf>
20. Овсянников Б.В., Боровский Б.И. Теория и расчет агрегатов питания жидкостных ракетных двигателей: Учебник. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 344 с.

## References

1. Kamenskii S.S., Martirosov D.S., Kolomentsev A.I. Similarity theory methods application for lpre steady-flow working procedures analysis. *Aerospace MAI Journal*, 2016, vol. 23, no. 1, pp. 32-37.
2. Casiano M., Hulka J., Yang V. Liquid-propellant rocket engine throttling: A comprehensive review. *45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit (02-05 August 2009; Denver, Colorado)*. DOI: 10.2514/6.2009-5135
3. Huzel D.K., Huang D.H. *Design of liquid propellant rocket engines*. NASA SP-125, 1967. Washington, D.C., 469 p. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19710019929/downloads/19710019929.pdf>
4. Yao Z., Qi Y., Bao W., Zang T. Thrust Control Method and Technology of Variable-Thrust Liquid Engine for Reusable Launch Rocket. *Aerospace*, 2023, vol. 10, no. 1: 32. DOI: 10.3390/aerospace10010032
5. Belyaev E.N., Kolomentsev A.I., Nasimento L.B., Nazarov V.P. *Vestnik SibGAU*. 2014, no. 1(53), pp. 109-113.
6. Gimadiev A.G. *Vybor parametrov, raschet staticheskikh i dinamicheskikh kharakteristik regulatora raskhoda topliva* (Parameters selection, static and dynamic characteristics calculation of flow regulator), Samara, SGAU, 2007, 63 p.

7. Zakharov N.D. *Dinamika nasosnykh system. Sbornik nauchnykh trudov* (Dynamics of pumping systems. Collection of scientific papers). Kiev, Naukova dumka, 1980, pp. 14-21.
8. Glikman B.F. *Avtomaticheskoe regulirovanie zhidkostnykh raketnykh dvigatelei* (Automatic control of liquid rocket engines). 2nd ed. Moscow, Mashinostroenie, 1989, 296 p.
9. Babkin A.I., Belov S.I., Rutovskii N.B., Solov'ev E.V. *Osnovy teorii avtomaticheskogo upravleniya raketnymi dvigatel'nymi ustanovkami* (Fundamentals of the theory of automatic control of rocket propulsion systems). 2nd ed. Moscow, Mashinostroenie, 1986, 452 p.
10. Il'in M.M., Kolesnikov K.S., Saratov Yu.S. *Teoriya kolebanii* (Vibration theory). 2nd ed. Moscow, MGTU im. N.E. Baumana, 2003, 272 p.
11. Aung K.M., Kolomentsev A.I., Martirosov D.S. Mathematical modelling of liquid rocket engine flow regulator in frequency and time domains. *Aerospace MAI Journal*, 2021, vol. 28, no. 1, pp. 96-106. DOI: 10.34759/vst-2021-1-96-106
12. Burtsev I.V. *Trudy NPO Energomash im. akademika V.P. Glushko*, 2022, no. S38-39. pp. 111-123.
13. Belyaev E.N., Chvanov V.K., Chervakov V.V. *Matematicheskoe modelirovanie rabocheho protsessa zhidkostnykh raketnykh dvigatelei* (Mathematical modelling of liquid rocket engines working process), Moscow, MAI, 1999, 224 p.
14. Burtsev I.V., Levochkin P.S., Martirosov D.S., Shil'nov M.A. *Trudy NPO Energomash im. akademika V.P. Glushko*, 2022, no. S38-39, pp. 103-110.
15. Gimadiev A.G. *Avtomatika i regulirovanie dvigatel'nykh ustanovok raketnykh i kosmicheskikh system* (Automatics and regulation of propulsion systems of rocket and space systems), Samara, SGAU, 2010, 201 p.
16. Gimadiev A.G., Bystrov N.D., Safin A.I. *Raschet regulatora raskhoda komponenta topliva ZhRD* (Calculation of the flow regulator of the liquid propellant component), Samara, Samarskogo universiteta, 2020, 72 p.
17. Zenin E.S., Men'shikova O.M., Fedotchev V.A. *Polet. Obshcherossiiskii nauchno-tekhnicheskii zhurnal*, 2013, no. 5, pp. 20-24.
18. Lebedinskii E.V., Zaitsev B.V., Sobolev A.A. *Mnogourovnevoe matematicheskoe modelirovanie regulatora raskhoda dlya ZhRD* (Multilevel mathematical modeling of the flow regulator for LRE). 2011. URL: <http://www.kerc.msk.ru/ipg/papers/model2.pdf>
19. Koshelev I.M., Martirosov D.S., Kolbasenkov A.I. *Dvigatel'*, 2012, no. 6(84), pp. 24-27. URL: <http://engine.aviaport.ru/issues/84/pics/pg24.pdf>
20. Ovsyannikov B.V. Borovskii B.I. *Teoriya i raschet agregatov pitaniya zhidkostnykh raketnykh dvigatelei* (Theory and calculation of power units for liquid-propellant rocket engines). 3rd ed. Moscow, Mashinostroenie, 1986, 344 p.

Статья поступила в редакцию 07.08.2023; одобрена после рецензирования 30.10.2023; принята к публикации 01.11.2023.

The article was submitted on 07.08.2023; approved after reviewing on 30.10.2023; accepted for publication on 01.11.2023.