

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ РАСЧЁТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАБИЛИЗАТОРА, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕГО СТАБИЛИЗАЦИЮ РАСХОДА РАБОЧЕГО ТЕЛА (ТОПЛИВА) В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ВХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Ю.А. Бешенев, А.В. Волков, Ф.А. Казанкин

ФГУП «Научно-исследовательской институт машиностроения»,
г. Нижняя Салда Свердловской области.

В данной статье представлена конструкция стабилизатора расхода (СР) предназначенная для поддержания постоянного заданного расхода компонентов топлива через двигатель, а также уменьшения времени выхода на установившийся режим при каждом включении ЖРДМТ в широком диапазоне входных параметров.

Стабилизатор расхода, постоянный расход компонентов топлива, экспериментальное подтверждение расчётных характеристик.

В связи с предъявлением все более высоких требований к повышению эффективности работы реактивных систем управления (РСУ) космических аппаратов (КА) существенно повышаются требования к энергетическим и динамическим характеристикам жидкостных ракетных двигателей малой тяги (ЖРДМТ).

Кроме того, в системах управления КА существует проблема выработки управляющего импульса заданным типом двигателя при минимальном времени включения. В связи с этим важно минимизировать время выхода на режим 90% тяги двигателя, иными словами, важно добиться максимальной скорости увеличения тяги после подачи команды на включение двигателя.

Одним из направлений решения проблемы разработки ЖРДМТ с улучшенными энергетическими и динамическими характеристиками является создание стабилизатора расхода (СР), предназначенного для поддержания постоянного заданного расхода компонентов топлива через двигатель, например, при изменении давления компонентов топлива на входе в двигатель вследствие выработки запаса газа наддува топливных баков, а также уменьшения времени выхода на установившийся режим при каждом включении ЖРДМТ.

С целью решения данной проблемы была поставлена задача по созданию стабилизатора расхода, позволяющего обеспечивать выполнение требований технического

задания в части ограничения отклонения тяги ($12 \pm 0,55$) кгс двигателя 11Д428А.000.00-22 за счёт стабилизации расхода топлива и, вследствие этого, стабилизации удельного импульса тяги и температуры камеры двигателя в эксплуатационном диапазоне входных давлений $13 \dots 20$ кгс/см².

Для решения поставленной задачи был разработан общий вид стабилизатора расхода представленный на рис. 1,

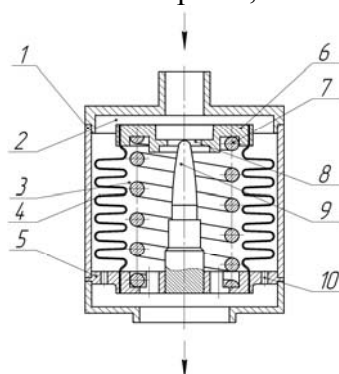


Рис. 1. Общий вид стабилизатора расхода
1-корпус; 2- входная полость; 3-выходная полость;
4-сильфон; 5-неподвижный фланец; 6- подвижный
фланец; 7-пружина; 8- отверстие соединяющее
входную и выходную полости;
9- профилированный регулирующий орган (шток);
10- дросселирующее отверстие

содержащий корпус с входной и выходной полостями, между которыми расположен чувствительный элемент в виде сильфона с неподвижным фланцем, закреплённым в корпусе на выходе из стабилизатора, и подвижным фланцем, расположенным на входе в стабилизатор, дополненный пружиной сжатия, растягивающей сильфон в исходном

состоянии и установленной, например, внутри сиффона. В подвижном фланце сиффона выполнено отверстие, соединяющее входную и выходную полости, а соосно с отверстием, неподвижно установлен профилированный регулирующий орган (шток).

Так как пружине при разработке можно задать, в принципе, любую заданную жёсткость, следовательно, и системе «пружина+

сиффон» при совместной работе также можно задать заранее выбранную любую жёсткость, несмотря на дискретность жёсткости стандартизированного сиффона. В ходе работы были проведены расчёты основных параметров сиффонного узла для стабилизатора расхода, результаты которого представлены таблице 1.

Таблица 1. Параметры сиффонного узла

Наименование параметров, размерность	Значение
Эффективная площадь сиффона с отверстием $F_{эф.}, \text{ см}^2$	4,0
Суммарный ход $h, \text{ мм}$	11,8
Жёсткость сиффона $C, \text{ Н/мм}$	16,5
Жёсткость сиффона по давлению $C_p, \frac{\text{Н}}{\text{мм} \cdot \text{см}^2}$	4,125
Давление, при котором сиффон из нейтрального положения совершит ход 5,9 мм на сжатие или растяжение $P, \text{ кгс/см}^2$	2,48
Сила, под действием которой сиффон растянется или сожмётся из нейтрального положения на 5,9 мм $Q_{сифф.}, \text{ кгс}$	9,93
Сила, которую должна принять на себя пружина при полном сжатии сиффона $Q_{пруж.}, \text{ кгс}$	18,1
Начальное поджатие пружины $I_{пруж.}, \text{ мм}$	14,3
Длина пружины в свободном состоянии $L, \text{ мм}$	51,2
Перепад давления $\Delta P, \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$	0...7

Используя данные представленные в таблице 1, построен график силовых характеристик системы “пружина + сиффон” показанный на рис.2.

В случае использования в качестве рабочего тела вредных, например, токсичных веществ, стабилизатор может быть ещё дополнен отверстиями в неподвижном фланце, например, одним для обеспечения протока нейтрализующих веществ. Так как при работе стабилизатора рабочее тело будет течь и через эти отверстия, а не только через отверстие в подвижном фланце с регулирующим органом (штоком), то в расчёте

формы профиля штока это должно быть учтено.

Учитывая всё выше сказанное, были рассчитаны основные параметры стабилизатора расхода для двигателя 11Д428А.000.00-22.

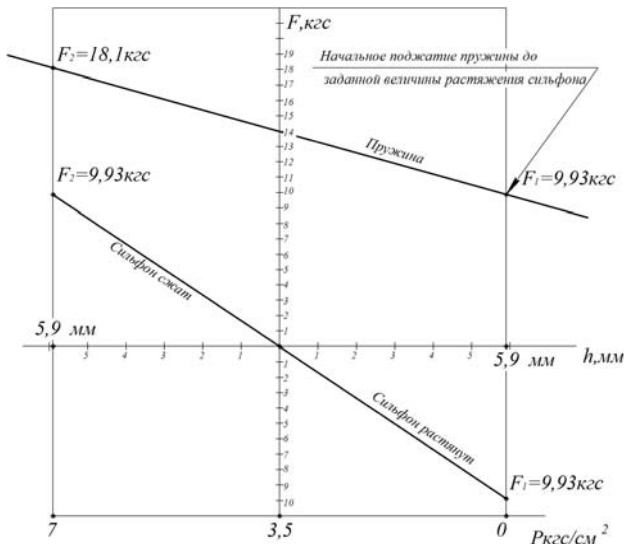


Рис.2. График силовых характеристик сильфонного узла

В таблице 2 на основании расчётов показано, как в зависимости от перепада давления (от 0,2 до 7,4 кгс/см²) должны изменяться основные параметры СР :

$d_{шт\text{ок}}$ - значение диаметра штока, обеспечивающего при разном перепаде давления и при перемещении днища сильфонного узла, постоянство расхода;

F_2 - площадь проходного сечения между отверстием в днище сильфонного узла и диаметром штока;

m_{01} - массовый расход через отверстие диаметром 0,3 мм сильфонного узла;

m_{02} -массовый расход через проходной канал, образованный отверстием в днище сильфонного узла и диаметром штока;

$m_{0\Sigma}$ - суммарный массовый расход.

Таблица 2. Расчётные параметры СР для двигателя 11Д428А-22

$\Delta P, \text{кгс/см}^2$	0,2	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8	2,1	2,4	2,7	3,0	3,3	3,6	3,9	4,1	4,4	4,7	5,0	6,3	6,6	6,9	9,2	6,9	6,9	7,0	7,4	
$d_{шт\text{ок}}, \text{мм}$	3,158	3,33	3,543	3,833	3,888	3,722	3,748	3,788	3,784	3,759	3,809	3,819	3,824	3,832	3,833	3,844	3,85	3,855	3,86	3,864	3,868	3,872	3,878	3,878	3,879	3,884	
$F_2, \text{см}^2$	0,6474	0,638	0,6271	0,622	0,6189	0,6168	0,6153	0,6141	0,6132	0,6124	0,6117	0,6111	0,6105	0,6103	0,6099	0,6095	0,6093	0,6092	0,6091	0,6090	0,6089	0,6088	0,6087	0,6087	0,6087	0,6087	0,6087
$m_{01}, \text{г/с}$	0,277	0,338	0,48	0,598	0,679	0,76	0,83	0,9	0,98	1,02	1,07	1,12	1,16	1,21	1,25	1,3	1,34	1,39	1,42	1,47	1,51	1,54	1,58	1,62	1,66	1,69	
$m_{02}, \text{г/с}$	18,59	18,53	18,39	18,26	18,19	18,11	18,04	17,97	17,91	17,85	17,8	17,74	17,71	17,68	17,62	17,57	17,53	17,48	17,44	17,4	17,36	17,33	17,29	17,25	17,22	17,18	
$m_{0\Sigma}, \text{г/с}$	18,87	18,87	18,7	18,56	18,59	18,67	18,67	18,67	18,67	18,67	18,67	18,67	18,67	18,67	18,67	18,67	18,67	18,67	18,66	18,67	18,67	18,67	18,67	18,67	18,67	18,67	18,67

Используя указанные выше параметры, была разработана конструкция сильфонного стабилизатора расхода 11Д428А.410.00,-01 общий вид которого приведен на рис. 3.

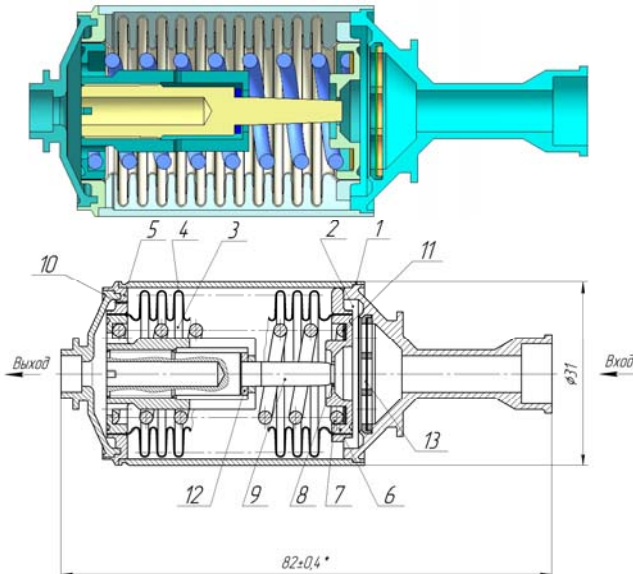


Рис.3. Конструкция стабилизатора расхода - 11Д428А.410.00,-01

1-корпус; 2- входная полость; 3-выходная полость; 4-сильфон; 5-неподвижный фланец; 6- подвижный фланец; 7-пружина; 8- отверстие соединяющее входную и выходную полости; 9- профилированный регулирующий орган (шток); 10- дросселирующее

отверстие; 11-регулирующие кольца, обеспечивающие начальное положение сильфонного узла;

12-регулирующие кольца фиксирующие положение штока для обеспечения заданного расхода;

13- фильтр

Стабилизатор расхода устанавливается на входе в электроклапан подачи компонента топлива в ЖРДМТ и работает следующим образом. В исходном состоянии электроклапан подачи компонента топлива в двигатель закрыт, расход рабочего тела отсутствует, давление на входе в стабилизатор и на его выходе равно рабочему давлению, перепад давления равен нулю. При открытии электроклапана давление на выходе из стабилизатора в полости 3 резко падает практически до давления, близкого к давлению окружающей среды, возникает максимальный, так называемый "бросковый" перепад давления между полостью 2 и полостью 3 (давление в камере сгорания двигателя ещё отсутствует), т.е. на сильфон 4 действует максимальный перепад давления, сильфон сжимается и, как поршнем, подаёт "бросковый" расход на заполнение заклпанных полостей головки и на запуск двигателя. При этом никаких запирающих узлов, перекрывающих

проходное сечение от выходной полости 3 стабилизатора до камеры сгорания двигателя, в стабилизаторе нет. Это обеспечивает минимальное время заполнения клапаных полостей и минимальное время выхода двигателя на установившийся режим. По мере роста давления в камере сгорания при запуске увеличивается давление в полости 3 стабилизатора при постоянном давлении в полости 2 на входе, т.е. перепад давления на стабилизаторе уменьшается, сильфон 4 из сжатого состояния при запуске возвращается в положение, определяемое динамическим равновесием действующих сил – сил от перепада давления на сильфоне 4 и сил упругости пружины 7 с сильфоном 4. Так как жёсткость сильфона с пружиной известна и известен закон перемещения подвижного фланца сильфона от приложенной силы (воздействующего перепада давления), то регулирующий орган 9 профилируется таким образом, чтобы площадь проходного сечения между отверстием 8 в подвижном фланце 6 и поверхностью регулирующего органа 9 гарантировала постоянный расход при изменении перепада давления в эксплуатационном диапазоне.

При изменении давления на входе в стабилизатор, например, в случае уменьшения давления, падает перепад давления на сильфоне 4 между полостями 2 и 3.

Силы упругости пружины и сильфона поступательно перемещают подвижный фланец 6 с отверстием 8 в сторону входа 2 стабилизатора, при этом увеличивается площадь проходного сечения между отверстием 8 и штоком 9. Шток 9 спрофилирован

так, что динамическое равновесие сил наступает всегда при заданном расходе через устройство в рабочем диапазоне перепадов давления.

Когда давление на входе увеличивается, то возрастает и перепад давления на сильфоне 4, сильфон сжимается, перемещая подвижный фланец 6 с отверстием 8 в сторону, противоположную входу 2 стабилизатора, площадь проходного сечения уменьшается, и равновесие сил наступает на заданном расходе, но при уменьшенном проходном сечении между отверстием 8 и штоком 9.

Для проверки работоспособности были изготовлены опытные образцы стабилизаторов расхода 11Д428А.410.00, -01 показанные на рис.4.



Рис.4. Опытный образец стабилизатора расхода - 11Д428А.410.00,-01

Все детали стабилизаторов по трактам горючего и окислителя были идентичны (рис.5), за исключением регулирующих органов (штоков), их профили рассчитывались отдельно.

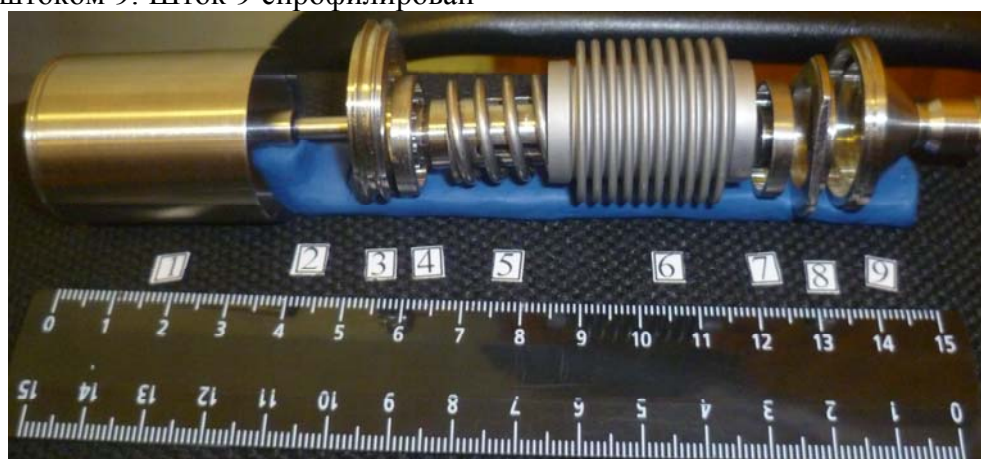


Рис.5. Детали опытного образца стабилизатора расхода 11Д428А.410.00,-01
1-корпус; 2-шток; 3- неподвижный фланец; 4-направляющая; 5-пружина; 6- сильфон; 7-кольцо; 8- подвижный фланец; 9-штуцер в сборе

Все детали стабилизаторов по трактам горючего и окислителя были идентичны, за исключением регулирующих органов (штоков), их профили рассчитывались отдельно.

Опытные образцы стабилизаторов настраивались на расходы воды 14,7 г/с (эквив-

валент горючего) и 18,87 г/с (эквивалент окислителя). На рис. 6 показаны графики изменения массового расхода воды через стабилизаторы расхода 11Д428А.410.00 “О” и 11Д428А.410.00-01 “Г” в зависимости от перепада давления.

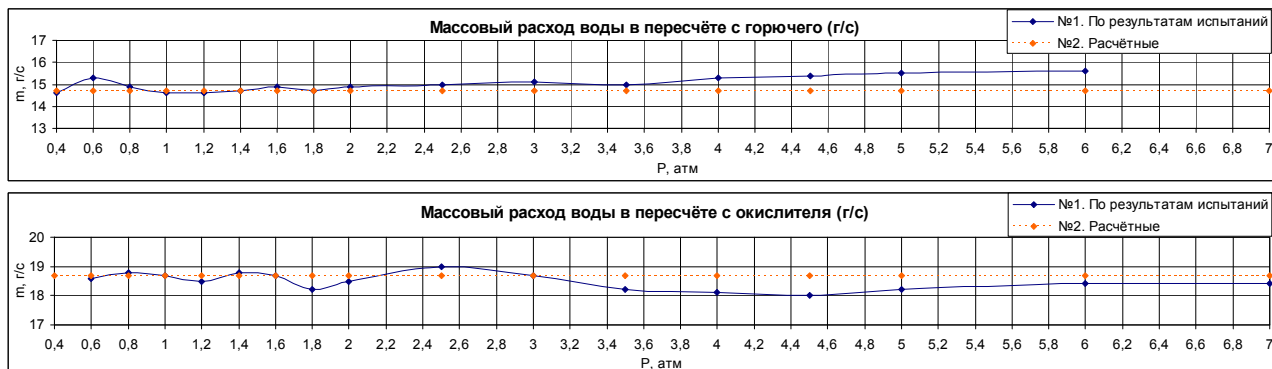


Рис. 6. Графики изменения массового расхода воды через опытные образцы стабилизаторов расхода в зависимости от перепада давления.

В ходе проделанной работы была экспериментально подтверждена работоспособность опытного образца сильфонного стабилизатора расхода, обеспечивающая выполнение требований в части ограниченного отклонения расхода по линиям окислителя и горючего в эксплуатационном диапазоне входных давлений 0,4...7,0 кгс/см².

Следует отметить, что к настоящему времени ещё не проведён полный цикл доводки стабилизатора. В частности не проверялась стойкость при циклических нагрузках, при гидроударах. Не проводились испытания в составе двигателя на натуральных компонентах топлива.

TEST VERIFICATION OF FLOW STABILIZER CALCULATED PARAMETERS PROVIDED FLOW STABILIZATION OF PROPELLANT IN WIDE RANGE OF INPUT PARAMETERS

Yu.A. Beshenev, A.V. Volkov, F.A. Kazankin

Federal State Unitary Enterprise
Research and Development Institute of Mechanical Engineering
Nizhnyaya Salda, Sverdlovsk region

This paper presents a flow stabilizer configuration intended for maintaining regular rated propellants flow through a thruster and also reducing time of transition to steady state mode for any thruster firing in wide range of output parameters.

Key words: flow stabilizer, regular rated propellants flow, test verification of calculated parameters.

Информация об авторах:

Бешенев Юрий Александрович, главный специалист по отработке РДМТ ФГУП «НИИМаш» г. Нижняя Салда. тел (34345) 36-5-16 E-mail: niimash@list.ru. Область научных интересов: расчётно-теоретические и экспериментальные исследования рабочих процессов в жидкостных ракетных двигателях малой тяги.

Волков Александр Валентинович инженер-конструктор I категории конструкторского отдела ФГУП «НИИМаш» г. Нижняя Салда. тел (34345) 36-2-51 E-mail: niimash@list.ru. Область научных интересов: расчётно-теоретические и экспериментальные исследования перспективных узлов и агрегатов энергоустановок и реактивных систем управления.

Казанкин Филипп Андреевич, заместитель главного конструктора ФГУП «НИИМаш» г. Нижняя Салда. тел (34345) 36-4-14 E-mail: niimash@list.ru. Область научных интересов: поисковые расчётно-теоретические и экспериментальные исследования по созданию перспективных образцов ракетно-космической техники

Authors information:

Beshenev Yurii A., Low-thrust Rocket Chief Specialist, FSUE R&D Institute Mechanical Engineering, Nizhnyaya Salda, Phone: (34345) 36-516, E-mail: niimash@list.ru. Area of research: design-theoretical and experimental researches of low-thrust rocket working processes.

Volkov Alexander V., design-engineer, FSUE R&D Institute Mechanical Engineering, Nizhnyaya Salda, Phone: (34345) 36-2-51 E-mail: niimash@list.ru. Area of research: design-theoretical and experimental researches of promising assemblies, power systems and reaction-control systems.

Kazankin Filipp A., Deputy of Chief Designer, FSUE R&D Institute Mechanical Engineering, Nizhnyaya Salda, Phone: (34345) 36-414, E-mail: niimash@list.ru. Area of research: design-theoretical and experimental researches for promising rocketry patterns creation.