

УДК 621.454:621.45.036

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЯ 11Д428А-22 ПРИ ВВЕДЕНИИ В ЕГО КОНСТРУКЦИЮ СИЛЬФОННОГО СТАБИЛИЗАТОРА РАСХОДА

© 2014 Ю.А. Бешенев, А.В. Волков, Ф.А. Казанкин

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

В данной статье представлены результаты анализа сравнительных огневых испытаний двухкомпонентного двигателя 11Д428А-22 с пластинчатым и сильфонным стабилизаторами расхода. Представленная в данной работе конструкция сильфонного стабилизатора расхода прямого действия 11Д428А.410.00, -01 отвечает всем современным требованиям и тенденциям развития такого вида объектов техники. В разрабатываемом стабилизаторе в качестве чувствительного элемента используется сильфон, который исключает какие-либо неконтролируемые перетечки рабочего тела и повышает надёжность путём исключения заклинивания или изменения сил трения, характерных для поршней и плунжеров. Применение пружины, растягивающей сильфон в исходном состоянии стабилизатора, расширяет диапазон регулирования и повышает точность поддержания заданного расхода во всем диапазоне регулирования. Стабилизатор расхода обеспечивает пусковой расход компонента топлива за счёт присоединительной массы, т. е. отрицательная роль для регулятора превращается в положительное свойство топливной магистрали и улучшается динамика работы двигателя. Новым в конструкции стабилизатора является совмещение функции регулятора и пускового устройства, а также расширение диапазона регулирования и точности регулирования за счёт применения пружины, растягивающей сильфон в исходном состоянии. Разрабатываемая конструкция проста в изготовлении и обеспечивает совпадение расчётных параметров регулятора с параметрами, полученными в результате испытаний.

Двигатель, стабилизатор расхода, постоянный расход компонентов топлива, динамика работы двигателя.

В системах управления космическими аппаратами (КА) существует проблема выработки управляющего импульса заданным типом двигателя при минимальном времени включения. В связи с этим важным является минимизация времени выхода на режим 90% тяги двигателя. Иными словами, важно добиться максимальной скорости нарастания тяги после подачи команды на включение двигателя.

С целью решения данной проблемы в 2010 г. была поставлена инициативная задача по созданию стабилизатора расхода, который позволил бы добиться максимальной скорости увеличения тяги после подачи команды на включение двигателя 11Д428А-22 и обеспечил бы отклонение его тяги на уровне $(12 \pm 0,55)$ кгс за счёт стабилизации расхода топлива и вследствие этого - стабилизацию удельного импульса тяги и температуры камеры двигателя в эксплуатационном диапазоне входных давлений 13...20 кгс/см².

Для решения данной задачи было принято решение спроектировать, изготовить и испытать стабилизаторы расхода на основе пластинчатой и сильфонной схем, а по результатам сравнительных и огневых испытаний выбрать один из вариантов конструкции.

Конструкции стабилизаторов расхода представлены на рис. 1, 2.

Для проверки работоспособности были изготовлены опытные образцы по пластинчатой и сильфонной схемам. Опытные образцы настраивались на расходы воды 14,7 г/с (эквивалент горючего) и 18,87 г/с (эквивалент окислителя). На рис. 3, 4 показаны графики изменения массового расхода воды через стабилизаторы расхода пластинчатого ["О", "Г"] и сильфонного типа ["О", "Г"]) в зависимости от перепада давления на входе в стабилизатор расхода (СР).

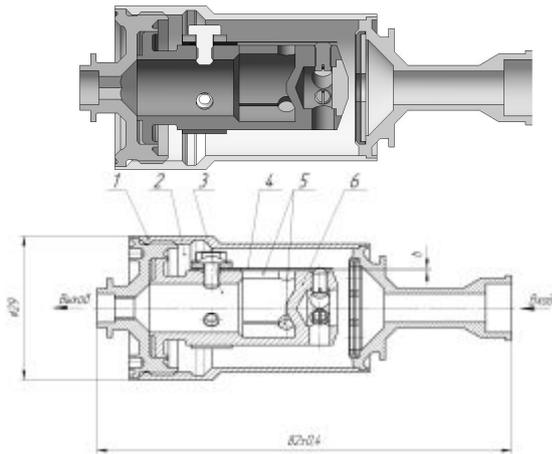


Рис.1. Пластинчатый стабилизатор расхода
11Д428.410.00, (-01)
(масса модельного образца - 110 г.):
1 - корпус в сборе; 2 - входная полость;
3 - выходная полость; 4 - пружинный элемент
(пластина); 5 - окна в узле настройки; 6 - корпус
узла настройки

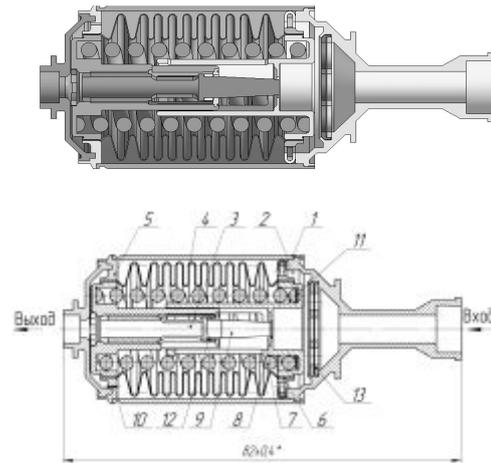


Рис.2. Сильфонный стабилизатор расхода
11Д428А.410.00, (-01)
(масса модельного образца - 115 г.):
1-корпус; 2- входная полость; 3-выходная
полость; 4-сильфон; 5-неподвижный фланец;
6- подвижный фланец; 7-пружина; 8- отверстие,
соединяющее входную и выходную полости;
9- профилированный регулирующий орган
(шток); 10- дросселирующее отверстие;
11-регулирующие кольца сильфонного узла;
12-регулирующие кольца штока; 13- фильтр

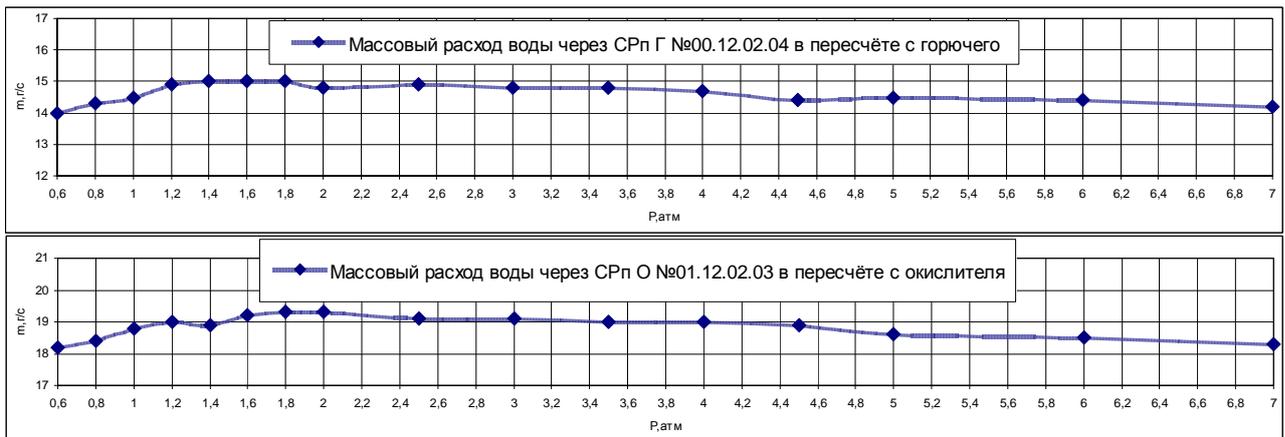


Рис.3. Массовый расход воды через опытные образцы пластинчатых стабилизаторов расхода (CPn) в зависимости от перепада давления на входе

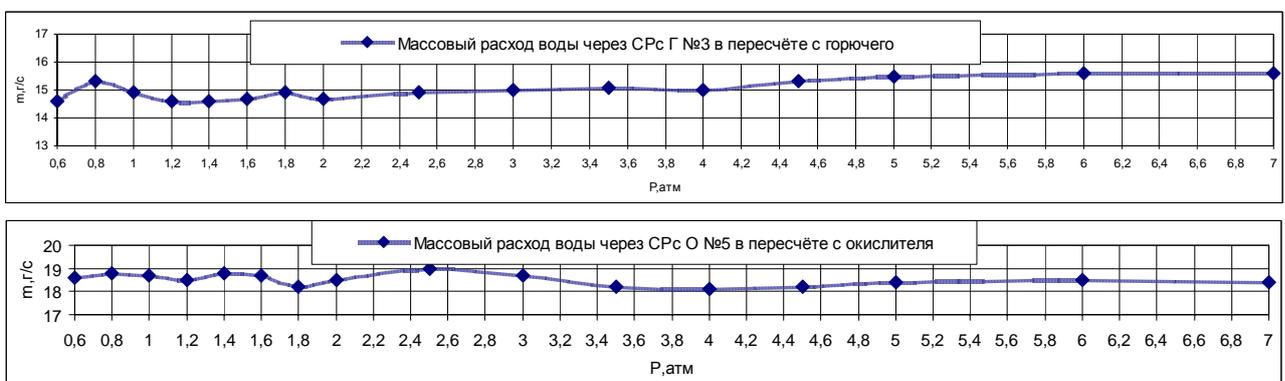


Рис.4. Массовый расход воды через опытные образцы сильфонных стабилизаторов расхода (CPc) в зависимости от перепада давления на входе

Для проверки работоспособности сифонного стабилизатора расхода при длительном ресурсе 50000 вкл. один из образцов был настроен на расход 43,8 г/с и подвергнут ресурсным испытаниям на трёх режимах:

- $P_{вх} = 0,490$ МПа (5 кгс/см²), $\tau_k = 0,050$ с, $f = 4$ Гц, $n_1 = 37000$ вкл.;
- $P_{вх} = 0,784$ МПа (8 кгс/см²),

- $\tau_k = 0,050$ с, $f = 4$ Гц, $n_2 = 5000$ вкл.;
- $P_{вх} = 0,637$ МПа (6,5 кгс/см²),
- $\tau_k = 0,050$ с, $f = 4$ Гц, $n_3 = 8000$ вкл.
- [$\Sigma n_{i=1,2,3} = 50000$ вкл.]

После каждого режима испытаний контролировались расходные характеристики. Результаты испытаний представлены в табл. 1 и на рис. 5.

Таблица 1 - Результаты ресурсных испытаний сифонного стабилизатора расхода

Перепад давления на стабилизаторе расхода (СР) ΔP , кгс/см ²	1	1,6	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	8	8,5	9	
Контроль настройки до испытаний на ресурс																	
Массовый расход воды через стабилизатор расхода (СР) m , г/с	43,5	44,7	43,4	44,1	45,2	44,1	44,4	44,6	44,5	43,9	44,0	43,6	43,5	43,4	43,4	43,6	
	После 10 000 вкл. (Первый режим)																
	43,1	44,4	44,0	45,5	45,3	44,7	43,8	44,3	44,4	43,9	43,9	43,5	43,1	43,3	43,3	43,5	43,5
	После 20 000 вкл. (Первый режим)																
	43,3	44,9	43,2	45,0	45,4	44,1	43,7	43,8	44,2	44,2	44,1	43,8	43,4	43,3	43,2	43,6	43,6
	После 30 000 вкл. (Первый режим)																
	43,3	43,8	44,7	46,4	45,8	45,4	44,8	44,1	44,5	44,1	44,2	43,7	43,6	43,2	43,5	43,5	43,5
	После 37 000 вкл. (Первый режим)																
	41,9	45,4	44,9	45,2	46,5	46,0	45,5	45,4	44,7	44,9	45,0	44,3	44,3	43,7	44,2	43,8	43,8
	После 42 000 вкл. (Второй режим)																
41,9	44,8	44,7	45,2	46,0	43,8	44,2	44,6	44,2	44,5	44,2	43,8	43,7	43,4	43,6	44,4	44,4	
После 50 000 вкл. (Третий режим)																	
42,4	44,8	44,3	45,9	45,9	44,9	44,0	44,0	44,3	44,1	44,0	43,8	43,1	43,3	43,5	43,9	43,9	

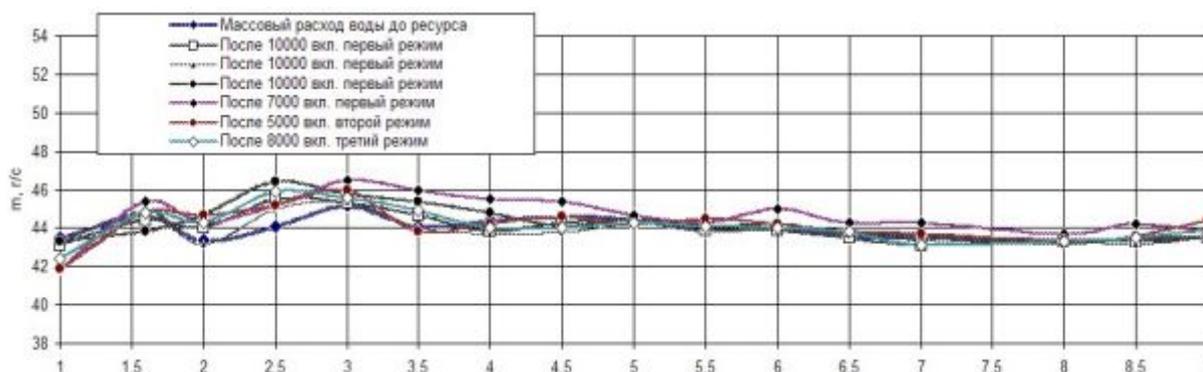


Рис. 5. Массовый расход воды через СР "О" в зависимости от перепада давления на входе в процессе ресурсных испытаний

Ресурсные испытания в объёме 50000 включений подтвердили стабильность расходных характеристик сифонного стабилизатора. Для получения двойного запаса надёжности по ресурсу испытания провели повторно на том же стабилизаторе с подтверждением стабильности расходных характеристик. Таким образом, стабилизатор расхода данного типа под-

твердил свою работоспособность после 100000 вкл.

Для выявления факта обеспечения сифонным СР "броскового" расхода был выполнен сравнительный эксперимент, в ходе которого были определены массы расходов воды через стабилизаторы обоих типов, настроенные на одинаковый расход и при одинаковых условиях работы, указанных в табл.2.

Таблица 2 - Результаты сравнительных испытаний сильфонного и пластинчатого СР по обеспечению “броскового” расхода

Давление на входе в СР ($P_{вх}=15,5 \text{ кгс/см}^2$)				
Время срабатывания τ , с	0,05	0,05	0,03	0,2
Частота f , Гц	4	8	10	2
Массовый расход воды через СР _п за 100 импульсов, (м, г/с)	109	109	58	360
Массовый расход воды через СР _с за 100 импульсов, (м, г/с)	204	266	178	675

На рис. 5, 6 представлены схемы размещения стабилизаторов расхода на испытательном стенде и результаты их испытаний.



Рис. 5. Размещение и результат испытания пластинчатого СР



Рис. 6. Размещение и результат испытания сильфонного СР

Эксперимент показал, что сильфонный СР обеспечивает “бросковый” расход, необходимый для заполнения клапанных полостей и на запуск двигателя, и тем самым должен улучшить динамику работы двигателя.

Чтобы выбрать оптимальный вариант конструкции СР, провели сравнительные огневые испытания пластинчатых стабилизаторов расхода (СРп) и сильфонных стабилизаторов расхода (СРс) в составе двигателя 11Д428А.000.00-22.

На рис. 7, 8 показаны схемы установки СР в двигателе и двигателях на стенде.



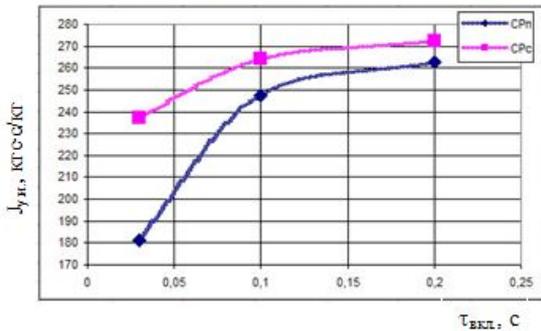
Рис. 7. Схема установки сильфонного СР в двигателе 11Д428А.000.00-22



Рис.8. Схема установки двигателя на стенде

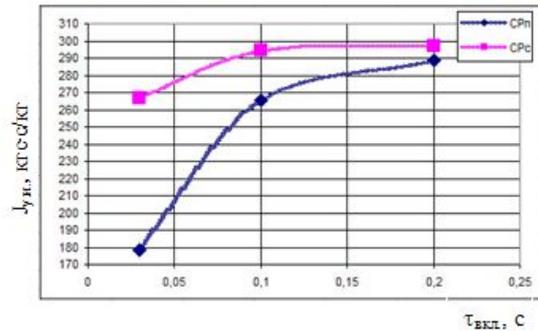
Графики зависимостей средних значений удельного импульса тяги ($J_{у.и.}$) и времени выхода на режим 90% установившегося значения тяги ($\tau_{0,9}$) от длительности включения двигателя при работе в импульсном режиме представлены на рис. 9, 10.

$P_{ЭК}=15,5 \text{ кгс/см}^2$, $T_{ЭК}=20 \text{ }^\circ\text{C}$, $U=27 \text{ В}$, $\tau_n=0,03 \text{ с}$.



а

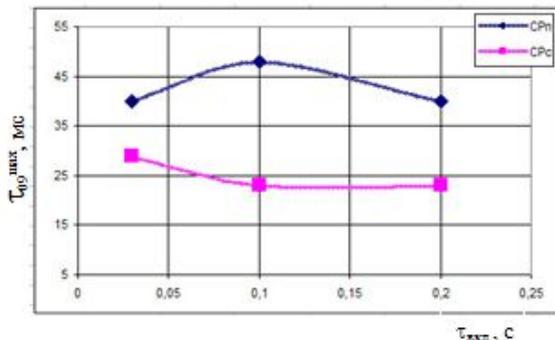
$P_{ЭК}=15,5 \text{ кгс/см}^2$, $T_{ЭК}=20 \text{ }^\circ\text{C}$, $U=27 \text{ В}$, $\tau_n=3,0 \text{ с}$.



б

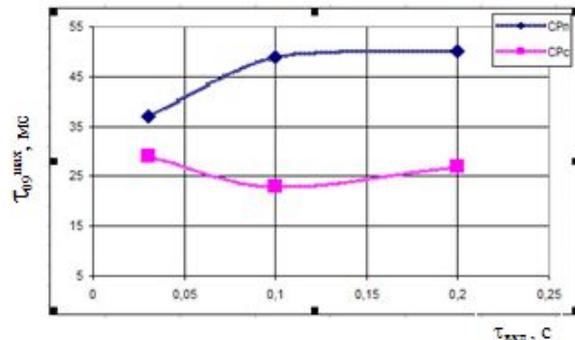
Рис.9. Графики зависимостей средних значений удельного импульса тяги ($J_{у.и.}$) от длительности включения двигателя ($\tau_{вкл.}$) при работе в импульсном режиме при ($\tau_n=0,03 \text{ с}$) (а) и ($\tau_n=3 \text{ с}$) (б)

$P_{ЭК}=13 \text{ кгс/см}^2$, $T_{ЭК}=20 \text{ }^\circ\text{C}$, $U=27 \text{ В}$, $\tau_n=0,03 \text{ с}$.



а

$P_{ЭК}=13 \text{ кгс/см}^2$, $T_{ЭК}=20 \text{ }^\circ\text{C}$, $U=27 \text{ В}$, $\tau_n=3,0 \text{ с}$.



б

Рис.10. Графики зависимости времени выхода на режим 90% установившегося значения тяги ($\tau_{0,9}^{max}$) от длительности включения двигателя ($\tau_{вкл.}$) при работе в импульсном режиме с ($\tau_n=0,03 \text{ с}$) (а) и ($\tau_n=3 \text{ с}$) (б)

Из графиков, приведённых на рис. 9, видно, что удельный импульс тяги двига-

телей с сильфонным стабилизатором расхода существенно выше, чем у двигателя

с пластинчатыми стабилизаторами при импульсных режимах работы с малыми длительностями включения (20 мс).

Это, по-видимому, связано с повышенной скоростью впрыска топлива в камеру сгорания за счёт “поршневого” эффекта, возникающего в сильфоне при включении двигателя.

Из характеристик на рис.10 видно, что время выхода двигателя с сильфонными стабилизаторами на режим установленной тяги на 20...25 мс меньше, чем у двигателя с пластинчатыми стабилизаторами

Информация об авторах

Бешенев Юрий Александрович, главный специалист по отработке РДМТ, Научно-исследовательской институт машиностроения, г. Нижняя Салда Свердловской области. E-mail: mail@niimashspace.ru. Область научных интересов: расчётно-теоретические и экспериментальные исследования рабочих процессов в жидкостных ракетных двигателях малой тяги.

Волков Александр Валентинович, инженер-конструктор первой категории, Научно-исследовательской институт машиностроения, г. Нижняя Салда Свердловской области. E-mail: mail@niimashspace.ru.

niimashspace.ru. Область научных интересов: расчётно-теоретические и экспериментальные исследования перспективных узлов и агрегатов энергоустановок и реактивных систем управления.

Казанкин Филипп Андреевич, заместитель главного конструктора, Научно-исследовательской институт машиностроения, г. Нижняя Салда Свердловской области. E-mail: mail@niimashspace.ru. Область научных интересов: поисковые расчётно-теоретические и экспериментальные исследования по созданию перспективных образцов ракетно-космической техники.

INVESTIGATION OF 11D428A-22 THRUSTER OPERATION DYNAMICS WITH BELLOWS FLOW STABILIZER

© 2014 Yu.A. Beshenev, A.V. Volkov, F.A. Kazankin

Federal State Unitary Enterprise Research & Development Institute of Mechanical Engineering, Nizhnyaya Salda, Sverdlovsk region, Russian Federation

This paper presents the results of comparative fire test investigations of the bipropellant thruster 11D428A-22 with both plate and bellows flow stabilizers. The direct-acting bellows flow stabilizer 11D428A.410.00/-01 presented in this paper meets all current requirements and progress trends of such type of hardware. In the developed stabilizer the bellows is used as a sensitive element, which excludes any uncontrollable leakages of a working medium and improves the reliability by eliminating cramping and varying frictional forces typical for pistons and plungers. The use of bellows-expanding spring at an initial state of the stabilizer extends the regulation range of the latter and increases the maintenance accuracy of specified flow over the entire control range. The flow stabilizer provides the starting propellant flow at the expense of added mass; hence the negative regulator effect becomes the favorable one in respect of a feed pipeline of liquid propellant thruster to improve thruster operation dynamics. Novelty of the flow stabilizer configuration is combining functions of a regulator and a starting device and broadening a regulation range and accuracy due to the spring expands the bellows at the initial state. The development construction is easy to fabricate and it provides the agreement of calculated regulator parameters and those resulted at the tests.

Liquid propellant thruster, flow stabilizer, propellant flow, thruster operation dynamics.

About the authors

Beshenev Yurii Alexandrovich, Chief specialist on low-thrust rocket development work, Federal State Unitary Enterprise Research & Development Institute of Mechanical Engineering, Nizhnyaya Salda, Sverdlovsk region. E-mail: mail@niimashspace.ru. Area of Research: design-theoretical and experimental research of operation processes in low-thrust rockets.

Volkov Alexander Valentinovich, design engineer, Federal State Unitary Enterprise Research & Development Institute of Mechanical Engineering, Nizhnyaya Salda,

Sverdlovsk region. E-mail: mail@niimashspace.ru. Area of Research: design-theoretical and experimental researches of advanced power system units and reaction control systems.

Kazankin Filipp Andreevich, Deputy of Chief Designer, Federal State Unitary Enterprise Research & Development Institute of Mechanical Engineering, Nizhnyaya Salda, Sverdlovsk region. E-mail: mail@niimashspace.ru. Area of Research: pilot design-theoretical and experimental researches on advanced space hardware creation.