

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

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

Федеральное государственное унитарное предприятие  
«Научно-исследовательский 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.

Ключевые слова: двигатель, стабилизатор расхода, постоянный расход компонентов топлива, исследование динамики работы двигателя.

***DYNAMIC PERFORMANCE INVESTIGATION OF 11D428A-22 THRUSTER  
WITH BELLOWS FLOW STABILIZER***

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

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

This paper presents the results of comparative fire test investigations of the 11D428A-22 bi-propellant thruster with plate and bellows stabilizers.

Key words: thruster, flow stabilizer, constant propellant flow, dynamic performance investigation of thruster.

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/см<sup>2</sup>.

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 рисунках 1 и 2.

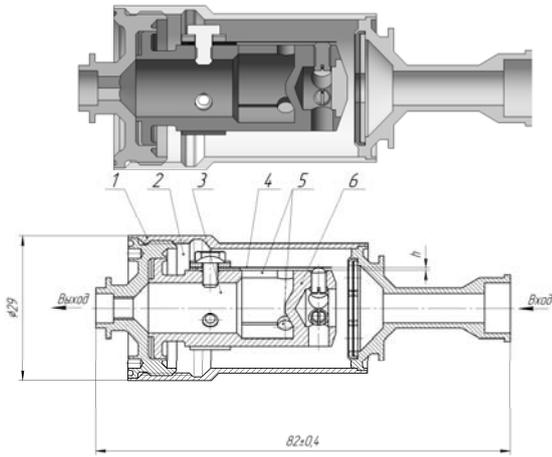


Рис.1. Пластинчатый стабилизатор расхода 11Д428.410.00, (-01)  
(масса модельного образца - 110 г.)

1 - корпус в сборе; 2 - входная полость; 3 - выходная полость; 4 - пружинный элемент (пластина); 5 - окна в узле настройки; 6 - корпус узла настройки.

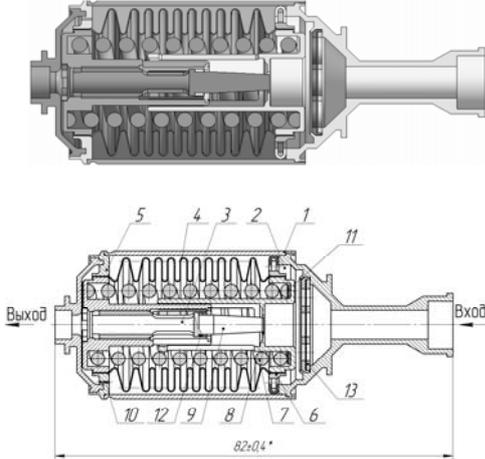


Рис.2. Сильфонный стабилизатор расхода 11Д428А.410.00, (-01)

(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.

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 рисунках 3 и 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).

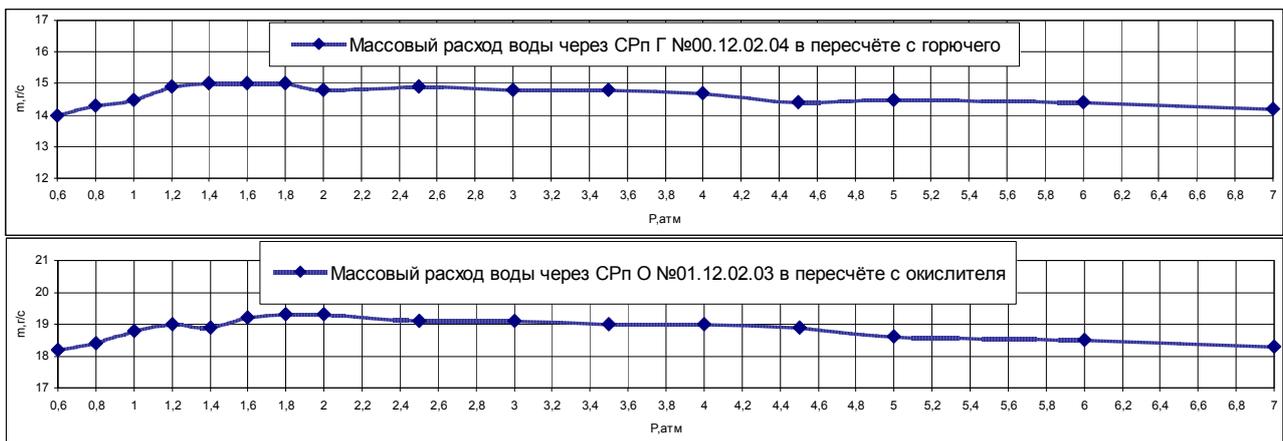


Рис.3. Массовый расход воды через опытные образцы пластинчатых стабилизаторов расхода(СРп) в зависимости от перепада давления на входе

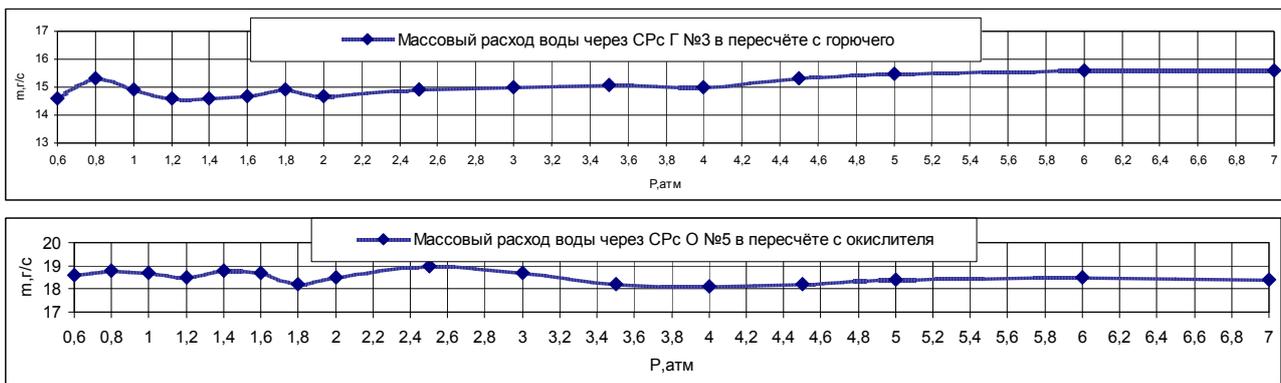


Рис.4. Массовый расход воды через опытные образцы  
сильфонных стабилизаторов расхода (СРс) в зависимости от перепада  
давления на входе

Для проверки работоспособности сильфонного 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/см<sup>2</sup>),  
 $\tau_k = 0,050$  с,  $f = 4$  Гц,  $n_1 = 37000$  вкл.;
- $P_{вх} = 0,784$  МПа ( $8$  кгс/см<sup>2</sup>),  
 $\tau_k = 0,050$  с,  $f = 4$  Гц,  $n_2 = 5000$  вкл.;

- $P_{вх} = 0,637$  МПа ( $6,5$  кгс/см<sup>2</sup>),  
 $\tau_k = 0,050$  с,  $f = 4$  Гц,  $n_3 = 8000$  вкл.  
[ $\sum n_{i=1,2,3} = 50000$  вкл.]

После каждого режима испытаний контролировались расходные характеристики. Результаты испытаний представлены в таблице 1 и на рисунке 5.

Таблица 1. Результаты ресурсных испытаний сильфонного стабилизатора расхода

Перепад давления на стабилизаторе расхода (СР) $\Delta P$ , кгс/см <sup>2</sup>	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
	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
	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
	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
	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	
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	

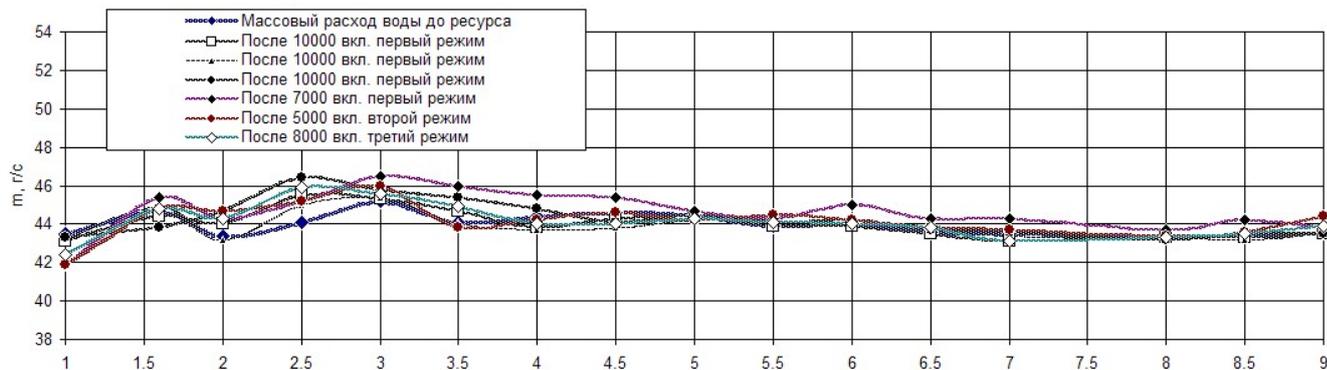


Рис. 5. Массовый расход воды через СР "О" в зависимости от перепада давления на входе в процессе ресурсных испытаний

Ресурсные испытания в объеме 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 подтвердил 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 таблице 1.

Таблица 1. Результаты сравнительных испытаний сифонного и пластинчатого СР по обеспечению "броскового" расхода

Давление на входе в СР ( $P_{вх}=15,5 \text{ кгс/см}^2$ )				
Время срабатывания $\tau$ , с	0,05	0,05	0,03	0,2
Частота $f$ , Гц	4	8	10	2
Массовый расход воды через $СР_{д.}$ 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 рисунках 5 и 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 сифонного СР*

Эксперимент показал, что сифонный СР обеспечивает “бросковый” расход, необходимый для заполнения заклапанных полостей и на запуск двигателя, тем самым,

должен улучшить динамику работы двигателя.

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

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



*Рис. 7.- Схема установки сифонного 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 рисунках 3, 4 и 5, 6.

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

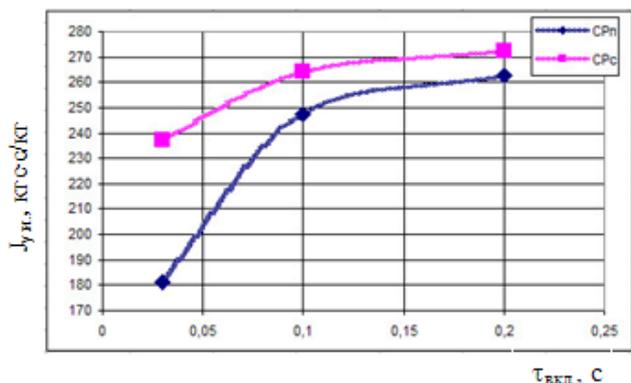


Рис.3.- Графики зависимостей средних значений удельного импульса тяги ( $J_{\text{у.и.}}$ ) от длительности включения двигателя ( $\tau_{\text{вкл.}}$ ) при работе в импульсном режиме при ( $\tau_n=0,03 \text{ с}$ ).

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

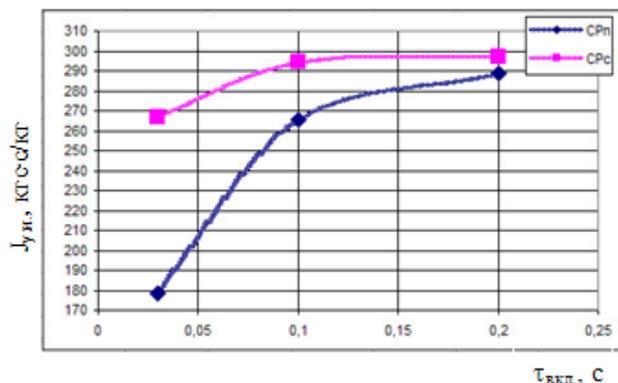


Рис.4.- Графики зависимостей средних значений удельного импульса тяги ( $J_{\text{у.и.}}$ ) от длительности включения двигателя ( $\tau_{\text{вкл.}}$ ) при работе в импульсном режиме при ( $\tau_n=3 \text{ с}$ ).

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

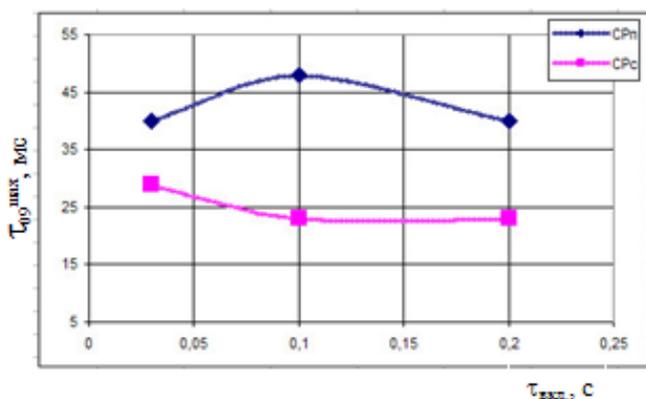


Рис.5.- Графики зависимости времени выхода на режим 90% установившегося значения тяги ( $\tau_{0,9}^{\text{max}}$ ) от длительности включения двигателя ( $\tau_{\text{вкл.}}$ ) при работе в импульсном режиме при ( $\tau_n=0,03 \text{ с}$ ).

Из графиков, приведенных на рисунках 3,4, видно, что удельный импульс тяги двигателей 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

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

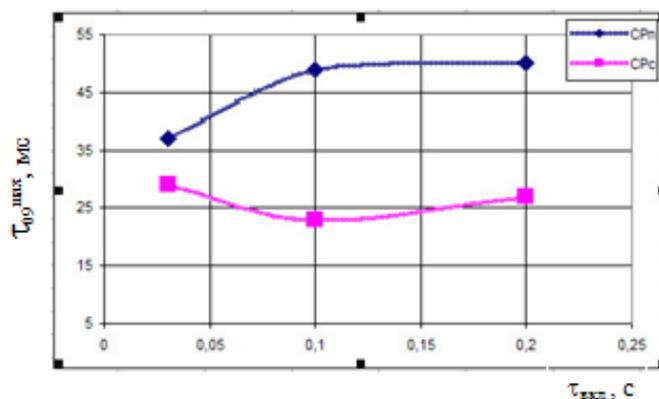


Рис.6.- Графики зависимости времени выхода на режим 90% установившегося значения тяги ( $\tau_{0,9}^{\text{max}}$ ) от длительности включения двигателя ( $\tau_{\text{вкл.}}$ ) при работе в импульсном режиме при ( $\tau_n=3 \text{ с}$ ).

сгорания за счёт “поршневого” эффекта, возникающего в сильфоне при включении двигателя.

Из характеристик на рисунках 5,6 видно, что время выхода двигателя с сильфонными стабилизаторами на режим установившейся тяги на 20...25 мс меньше, чем у двигателя с пластинчатыми стабилизаторами.

### Информация об авторах:

**Юрий Александрович Бешенев**, главный специалист по отработке РДМТ ФГУП «НИИМаш»; г. Нижняя Салда Свердловской области, тел + 7 (34345) 36-516, e-mail: [mail@niimashspace.ru](mailto:mail@niimashspace.ru). Область научных интересов: расчётно-теоретические и экспериментальные исследования рабочих процессов в жидкостных ракетных двигателях малой тяги.

**Александр Валентинович Волков**, инженер-конструктор I категории ФГУП «НИИ-

Маш»; г. Нижняя Салда Свердловской области, тел +7 (34345) 36-251, e-mail: [mail@niimashspace.ru](mailto:mail@niimashspace.ru). Область научных интересов: расчётно-теоретические и экспериментальные исследования перспективных узлов и агрегатов энергоустановок и реактивных систем управления.

**Филипп Андреевич Казанкин**, заместитель главного конструктора ФГУП «НИИ-Маш»; г. Нижняя Салда Свердловской области, тел +7 (34345) 36-414, e-mail: [mail@niimashspace.ru](mailto:mail@niimashspace.ru). Область научных интересов: поисковые расчётно-теоретические и экспериментальные исследования по созданию перспективных образцов ракетно-космической техники.

#### **Author information**

**Yurii A. Beshenev**, Chief specialist on low-thrust rocket development work, FSUE R&D Institute of Mechanical Engineering, Nizhnyaya Salda, Sverdlovsk region, phone: +7 (34345) 36-516, e-mail: [mail@niimashspace.ru](mailto:mail@niimashspace.ru). Area of research: design-theoretical and experimental research of operation processes in low-thrust rockets.

**Alexander V. Volkov**, design-engineer, FSUE R&D Institute of Mechanical Engineering, Nizhnyaya Salda, Sverdlovsk region, phone: +7 (34345) 36-251, e-mail: [mail@niimashspace.ru](mailto:mail@niimashspace.ru). Area of research: design-theoretical and experimental researches of advanced power system units and reaction control systems.

**Filipp A. Kazankin**, Deputy of Chief Designer, FSUE R&D Institute of Mechanical Engineering, Nizhnyaya Salda, Sverdlovsk region, phone: +7 (34345) 36-414, e-mail: [mail@niimashspace.ru](mailto:mail@niimashspace.ru). Area of research: pilot design-theoretical and experimental researches on advanced space hardware creation.