

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КОРМОВЫХ ДИФFUЗОРОВ  
В ВАКУУМНЫХ СИСТЕМАХ СТЕНДА  
ДЛЯ ВЫСОТНЫХ ОГНЕВЫХ ИСПЫТАНИЙ  
ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МАЛОЙ ТЯГИ**

©2016 Р.Н. Гальперин, Ю.И. Гуляев, Ю.С. Ивашин, В.Е. Нигодюк, В.В. Рыжков,  
А.В. Сулинов

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

**EXPERIMENTAL EFFECTIVENESS ANALYSIS OF EXHAUST DIFFUSERS  
IN VACUUM SYSTEMS STAND FOR HIGH-ALTITUDE FIRING TESTS  
OF LIQUID ROCKET ENGINES WITH SMALL THRUST**

Galperin R.N., Gulyaev Y. I., Ivashin Y.S., Nigodjuk V.E., Ryzhkov V.V., Sulinov A.V.  
(Samara National Research University, Samara, Russian Federation)

*The report gives results of the vacuum bench system exhaust diffusers boundaries experimental study for high-altitude firing tests of liquid rocket engines with small thrust.*

Одной из задач высотных огневых испытаний при исследованиях рабочего процесса жидкостных ракетных двигателей малой тяги (ЖРДМТ) является обеспечение в процессе работы двигателя безотрывного течения продуктов сгорания в сопле, что позволяет измерять тягу и достоверно определять энергетические параметры двигателя. Задача может быть решена с использованием вакуумной системы, в составе которой используется кормовой (выхлопной) диффузор. Применение кормового диффузора расширяет возможности вакуумной системы стенда при высотных огневых испытаниях ЖРДМТ. Однако результаты исследований подобных систем для имеющих большие геометрические степени расширения сопла 45...400 ЖРДМТ, работающих в непрерывных режимах, отсутствуют [1].

Цель экспериментального исследования - определение геометрических размеров и установочных параметров кормовых диффузоров, обеспечивающих в вакуумной системе режим безотрывного течения продуктов сгорания в сопле испытываемого двигателя.

Экспериментальные исследования проведены на термовакуумном огневом стенде для испытаний ЖРДМТ [2] в Научно-исследовательском центре космической энергетики Самарского университета.

Вакуумная система стенда включает две вакуумные камеры ВК1 и ВК2, соединённые между собой через кормовой диффузор. В камере ВК1 размещается испытываемый

ЖРДМТ и оборудование в зависимости от решаемой задачи. Вакуумная камера ВК2 соединена с вакуумными насосами и используется как буферный объём, необходимый для запуска кормового диффузора, охлаждения и аккумуляции продуктов сгорания работающего ЖРДМТ.

При испытаниях применялся ЖРДМТ номинальной тягой 50 Н с геометрической степенью расширения  $\bar{F}_a = 50$ . Длительность включения двигателя изменялась в диапазоне от 3 до 20 с.

В работе исследовалось влияние установочных размеров кормового диффузора относительно среза сопла двигателя: положение входного сечения диффузора относительно среза сопла двигателя изменялось в осевом направлении в диапазоне от  $\delta = (-2 \dots +10)$  мм (знак «минус» означает расположение среза сопла двигателя внутри кормового диффузора), а также геометрических параметров трёх кормовых диффузоров, отличающихся друг от друга внутренним диаметром канала диффузора 66, 81 и 96 мм и имеющих относительную длину канала равную  $\sim 10$ .

Для исследования границ срывного режима работы кормового диффузора использовался нерасходный режим работы вакуумной системы, когда вакуумная камера ВК2 изолировалась от вакуумных насосов. Нерасходный вариант работы вакуумной системы позволял оценить и зафиксировать

давление в вакуумной камере ВК2, при котором происходит срыв работы кормового диффузора и, как следствие, создаются условия для образования скачка уплотнения в сопле двигателя - по резкому росту давления продуктов сгорания в вакуумной камере ВК1.

В процессе экспериментального исследования осуществлялись измерения давления разрежения в вакуумных камерах ВК1 и ВК2, параметров ЖРДМТ (тяга, давление в камере сгорания, расходы компонентов, давления и температуры компонентов на входе в двигатель).

Анализ экспериментальных данных исследования влияния положения входного сечения кормового диффузора относительно среза сопла двигателя для диффузора с внутренним диаметром 66 мм (близкое к наружному диаметру сопла) показал, что расположение сопла двигателя внутри кормового диффузора недопустимо, т.к. приводит к изменению уровня пустотной тяги двигателя. Подобные результаты были получены при удалении сопла от кормового диффузора более  $\delta = +6$  мм (при  $\delta = +10$  мм). Для других диффузоров внутренним диаметром 81 и 96 мм изменение положения диффузора относительно двигателя в диапазоне от + 0 мм до + 10 мм не влияло на значения измеряемой тяги ЖРДМТ.

Исследования срывного режима работы диффузора проводились при осевом зазоре  $\delta = + 2$  мм и состояли в следующем. Перед началом эксперимента в обеих вакуумных камерах создавалось разрежение  $\sim 1$  мм рт. ст., затем вакуумная камера ВК2 изолировалась, далее в процессе работы ЖРДМТ происходил рост давления за кормовым диффузором (в вакуумной камере ВК2) и при достижении в ней давления  $p_{н\ срыв}$  происходил срыв работы кормового диффузора.

Обобщённые результаты исследования влияния внутреннего диаметра кормового диффузора на значение давления за кормовым диффузором (давления окружающей среды)  $p_{н\ срыв}$ , при котором происходил срыв потока в диффузоре и образование скачка уплотнения в сопле, приведены в табл. 1 в виде зависимости отношения давлений в камере сгорания  $p_{к}$  к давлению окружающей среды (давлению разрежения в вакуумной

камере ВК2)  $p_{н\ срыв}$  от отношения площадей кормового диффузора  $F_{диф}$  и минимального сечения  $F_{м}$  сопла двигателя ( $d_{диф}$  – внутренний диаметр диффузора;  $d_{м}$  - диаметр минимального сечения сопла ЖРДМТ).

Таблица 1 – Результаты экспериментального исследования параметров ЖРДМТ и вакуумной системы при срыве работы кормового диффузора

$d_{диф} / d_{м}$	7,67	9,42	11,2
$F_{диф} / F_{м}$	58,9	88,7	125
$p_{к}$ , МПа	0,66	0,66	0,68
$p_{Нсрыв}$ , кПа (мм рт. ст.)	17,3 (130)	10,7 (80)	6,9 (52)
$p_{к} / p_{Нсрыв}$	37,3	60,6	96,2

Из полученных результатов экспериментального исследования можно отметить следующее:

- в диапазоне монтажных установочных размеров  $\delta = (+0...+10)$  мм обеспечивается функциональная работа кормового диффузора вне зависимости от его диаметра в исследуемых пределах изменения;
- в исследуемом диапазоне диаметра кормового диффузора также обеспечивается функциональная работа диффузора, что позволяет получать достоверные результаты работы ЖРДМТ;
- с ростом внутреннего диаметра кормового диффузора в диапазоне от 66 до 96 мм давление разрежения  $p_{н\ срыв}$ , при котором происходит срыв работы кормового диффузора и нарушается безотрывный режим течения продуктов сгорания в сопле двигателя, падает со 130 до 52 мм рт. ст., что позволяет при правильном выборе параметров диффузора существенно увеличить время работы двигателя в вакуумной камере.

#### Библиографический список

1. Шишков А.А., Силин Б.М. Высотные испытания реактивных двигателей. – М.: Машиностроение, 1985. 208с.
2. Гальперин Р.Н., Ивашин Ю.С., Нигдюк В.Е., Рыжков В.В., Сулинов А.В. Автоматизированный термовакуумный огневой стенд для испытаний и исследований рабочего процесса ЖРДМТ на самовоспламеняющихся компонентах топлива // Вестник СГАУ. 2014. № 5 (47). С. 45-58.