

**РАСЧЁТНАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ СРЫВА РАБОТЫ  
КОРМОВЫХ ДИФFUЗОРОВ В ВАКУУМНЫХ СИСТЕМАХ СТЕНДА  
ДЛЯ ВЫСОТНЫХ ОГНЕВЫХ ИСПЫТАНИЙ  
ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МАЛОЙ ТЯГИ**

© 2016 В.Е. Нигодюк, В.В. Рыжков, А.В. Сулинов

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

**THE ESTIMATION OF FAILURE PARAMETERS OF EXHAUST DIFFUSERS  
IN VACUUM SYSTEMS STAND FOR HIGH-ALTITUDE FIRING TESTS  
OF LIQUID ROCKET ENGINES WITH SMALL THRUST**

Nigodjuk V.E., Ryzhkov V.V., Sulinov A.V. (Samara National Research University, Samara, Russian Federation)

The report presents numerical research results of failure parameters in the exhaust diffusers of vacuum systems stand for high-altitude firing tests of liquid rocket engines with small thrust.

Измерение тяги жидкостных ракетных двигателей малой тяги (ЖРДМТ) требует реализации в вакуумной системе стенда в процессе высотных огневых испытаний двигателя безотрывного течения продуктов сгорания в сопле. Применение кормовых диффузоров может повысить возможности стенда при огневых испытаниях ЖРДМТ [1].

Известно использование кормовых диффузоров для высотных испытаний ракетных двигателей больших тяг, прежде всего, в условиях атмосферного давления окружающей среды [2]. В зависимости от тяги, геометрической степени расширения сопла (или высотности сопла) и режимов работы ракетного двигателя можно выделить несколько принципиальных схемных решений систем с кормовым диффузором.

Во-первых, схема системы с вакуумной камерой, в которой разрежение создается эжектирующим действием струи, истекающей из испытываемого ракетного двигателя, при этом кормовой диффузор установлен соосно с соплом двигателя. В этом случае двигатель может располагаться в вакуумной камере либо только сопловой частью, либо в целом. Тогда до начала испытаний разрежение не создается и для запуска диффузора необходим определённый уровень давления в двигателе. Такая вакуумная система позволяет проводить испытания только на установленном режиме при наличии полнорасходной струи продуктов сгорания.

Другой вариант реализации схемы на выходе из диффузора, присоединённого к содержащей двигатель вакуумной камере,

может быть установлена герметичная отбрасываемая заглушка. При этом после предварительного вакуумирования создаются условия для имитации высотных условий и в начальный период воспламенения. Кроме того, на выходе из диффузора может быть установлена предварительно вакуумируемая ёмкость с отбрасываемой герметичной заглушкой.

Во-вторых, схемы высотных стендов с установленными на выходе из диффузора эжекторными или другими мощными откачивающими устройствами газоотводящей вакуумной системы. С их помощью обеспечивается разрежение как в период воспламенения, так в процессе работы двигателя.

Однако результаты исследований работы вакуумных систем с кормовым диффузором в стендах для высотных огневых испытаний ЖРДМТ, имеющих значительно большие геометрические степени расширения сопла 45...400, отсутствуют. Одной из проблем в реализации подобных систем является обеспечение работы кормовых диффузоров без срыва.

Цель настоящего расчётного исследования - определение параметров срыва работы кормового диффузора вакуумной системы, при котором нарушается режим безотрывного течения продуктов сгорания в сопле испытываемого двигателя.

В исследовании рассматривалась схема вакуумной системы, состоящая из двух вакуумных камер ВК1 и ВК2, соединённых между собой через кормовой диффузор. В камере ВК1 размещается испытываемый

ЖРДМТ. Вакуумная камера ВК2 соединена с вакуумными насосами и используется как буферный объём, необходимый для запуска кормового диффузора, охлаждения и аккумуляции продуктов сгорания работающего ЖРДМТ. Перед запуском ЖРДМТ в обеих вакуумных камерах создается давление (разрежение), существенно меньшее значения давления продуктов сгорания на срезе сопла.

В предлагаемой физической модели рабочего процесса системы: двигатель-кормовой диффузор, - потери полного давления в псевдоскачке, развивающемся в канале диффузора, принимаются такими же, как и в прямом скачке, несмотря на то, что течение в канале кормового диффузора неоднородное (из-за рассеяния в выходном сечении сопла испытываемого двигателя, расширения потока после выхода из сопла, струйного пограничного слоя, натекающего на стенку диффузора). Исходя из заложенного в модель основного положения, давление окружающей среды  $p_{Нср\у\е}$ , при котором происходит срыв работы диффузора и режима течения в сопле двигателя, можно определить с некоторым запасом (вследствие неучета неоднородности входного течения и потерь давления в дозвуковом потоке диффузора) из выражения [2]:

$$\frac{p_k}{p_{Нср\у\е}} = \frac{q(1/\lambda_{вх})}{q(\lambda_{вх})\pi(1/\lambda_{вх})} = y(1/\lambda_{вх}) \frac{F_{диф}}{F_m},$$

где  $q(\lambda_{вх}), q(1/\lambda_{вх}), \pi(1/\lambda_{вх}), y(1/\lambda_{вх})$  - газодинамические функции;  $\lambda_{вх}$  - приведённая скорость потока на входе в кормовой диффузор (или в выходном сечении сопла двигателя).

Расчётное исследование и сравнение расчётных данных с результатами эксперимента было проведено на примере ЖРДМТ номинальной тягой 50 Н с геометрической степенью расширения  $\bar{F}_a = 50$ . В расчёте параметры продуктов сгорания ЖРДМТ принимались для «замороженного» течения продуктов сгорания в сопле. Используемые экспериментальные данные были получены для трёх кормовых диффузоров, отличающихся друг от друга внутренним диаметром канала диффузора 66, 81 и 96 мм и имеющих относительную длину канала, равную ~ 10.

Результаты расчёта границ срывной работы кормового диффузора по давлению  $p_{Нср\у\е}$  представлены в табл. 1 в виде зависимости отношения давлений в камере сгорания  $p_k$  к давлению окружающей среды - давлению разрежения в вакуумной камере ВК2  $p_{Нср\у\е}$  от отношения площадей кормового диффузора  $F_{диф}$  и минимального сечения  $F_m$  сопла двигателя.

Таблица 1 – Результаты исследования параметров срыва работы кормового диффузора

$F_{диф} / F_m$	58,9	88,7	125
$p_k$ , МПа	0,66	0,66	0,68
Результаты эксперимента			
$p_{Нср\у\е}$ , кПа (мм рт. ст.)	17,3 (130)	10,7 (80)	6,9 (52)
$p_k / p_{Нср\у\е}$	37,3	60,6	96,2
Результаты расчёта			
$y(1/\lambda_{вх})$	0,648	0,648	0,648
$p_{Нср\у\е}$ , кПа	17,3	11,5	8,4
$p_k / p_{Нср\у\е}$	38,2	57,5	81,0
Отклонения, %	+ 2,4	- 5,1	- 15,8

Максимальное отклонение расчётных данных от экспериментальных не превышает 16 %.

Таким образом, расчётная модель позволяет оценивать давление  $p_{Нср\у\е}$ , при котором происходит срыв работы кормового диффузора и нарушение расчётного режима течения продуктов сгорания в сопле двигателя. Определяемые значения давления  $p_{Нср\у\е}$  необходимо учитывать при проектировании стендовых вакуумных систем.

#### Библиографический список

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