

УДК 621.454.2.035.5

Д.А. ШАМРОВСКИЙ, Н.В. ДЕШЕВЫХ*ГП Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля, Днепропетровск, Украина***ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ КОРМОВЫХ ДИФFUЗОРОВ
НА СОВМЕСТНУЮ РАБОТУ ВЫСОТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ РД-8 И РД-120
С ГДТ ПРИ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЯХ**

Проведено исследование влияния наличия кормового диффузора газодинамической трубы (ГДТ) и его геометрических размеров на возможность совместной работы двигателя с ГДТ на режиме после запуска с учетом действительных энергетических параметров потока продуктов сгорания. Представлена методология построения граничных кривых запуска – срыва ГДТ, которые позволяют определить минимальные допустимые величины давления в камере сгорания при запуске и на режиме после запуска. Проведен сравнительный анализ граничных кривых запуска – срыва ГДТ с результатами наземных огневых испытаний двигателя РД-8.

диффузор, газодинамическая труба, совместная работа двигателя с ГДТ, кривые запуска – срыва ГДТ

Введение

Постановка проблемы и ее связь с научно-практическими задачами. Для проведения наземного испытания ЖРД с достоверным определением тяги необходимо, чтобы истечение потока из сверхзвуковой части сопла было безотрывным. Испытание высотного ЖРД, у которого давление на срезе сопла значительно меньше атмосферного, необходимо проводить только при помощи специального стендового оборудования, которое позволяет обеспечить требуемое давление в районе среза сопла. Выбор такого оборудования зависит от энергетических параметров потока продуктов сгорания топлива на срезе сопла камеры двигателя. В качестве такого стендового оборудования могут применяться газодинамические трубы (ГДТ). ГДТ не требуют дополнительных затрат энергии, в них для создания пониженного давления в районе среза сопла используются эжектирующие свойства струи газа, истекающей из сопла. Обычно ГДТ состоит из конфузора (конического сходящегося участка), горла (цилиндрического участка) и диффузора (конического расходящегося участка).

После запуска ГДТ сверхзвуковой поток из конфузора поступает в горло ГДТ, где скорость потока существенно снижается. Поток становится звуковым или дозвуковым. В кормовом диффузоре происходит восстановление давления потока до атмосферного, таким образом, применение кормового диффузора позволяет существенно понизить давление в горле ГДТ. Возможность снижения давления в горле ГДТ позволяет получить значительное отличие между уровнем давления в камере сгорания испытываемого высотного двигателя, необходимым для надежного запуска ГДТ и допустимым уровнем минимального давления в камере сгорания при дросселировании двигателя без риска срыва ГДТ. Большой коэффициент восстановления давления в диффузоре может быть получен только при сравнительно малом угле расширения (7-8 градусов). Поэтому при проектировании диффузоров обычно приходится идти на компромисс между желанием получить большую величину восстановления давления и не слишком большую его длину [1].

ГДТ не всегда включает в себя диффузор. Так, например, двигатель РД-120 успешно испытывается в наземных условиях с ГДТ без диффузора.

Поэтому рассмотрение газодинамических процессов, происходящих в диффузоре, и влияние его геометрических размеров на допустимые параметры испытываемого двигателя является актуальной научно-практической задачей.

Обзор публикаций и выделение нерешенных задач. В [2] проведено сравнение различных конфигураций ГДТ на эффективность процессов запуска и работы на режиме. Отмечено, что отличие площадей горла ГДТ и кормового диффузора приводит к тому, что эффективность ГДТ на установившемся режиме выше, чем при запуске. Это сравнение выполнено на основании анализа особенностей газодинамического течения идеального газа в одномерном приближении [3] по соответствующим газодинамическим зависимостям [4]. В [1] представлен анализ физических причин возникновения потерь давления в кормовом диффузоре. Из этого анализа следует, что малый угол полуоткрытия диффузора и, как следствие, его большая длина обусловлены, главным образом, стремлением избежать значительных потерь давления на трение и отрыв потока.

Анализ рассмотренных литературных источников показал, что эффект влияния геометрических размеров диффузора на отличие между допустимыми уровнями давления в камере сгорания при запуске ГДТ и на режиме известен. Но в проведенных исследованиях не учтены особенности действительных процессов горения и истечения продуктов сгорания, сопровождающихся значительными потерями энергии, и нет данных о сравнении результатов расчетов и экспериментальных данных.

Изложение основного материала с обоснованием полученных научных результатов

Расчетно-теоретические исследования влияния наличия диффузора и его геометрических размеров на совместную работу двигателя и ГДТ выполнены применительно к ГДТ, с помощью которой проводятся наземные испытания двигателей РД-8.

Оценка влияния геометрических размеров диффузора проведена путем определения условий возможности работы двигателя с ГДТ на режиме после запуска. Методология определения этих условий представлена в [5] и, в общем виде, состоит в следующей алгоритмической последовательности.

С учетом особенностей энергетики потока продуктов сгорания, путем расчета условий возникновения скачка уплотнения внутри сопла, определен критерий возможности запуска ГДТ, который показывает отличие между предельным допустимым давлением ($p_{пред}$) и давлением окружающей среды (p_n):

$$dp1 = p_{пред} - p_n \tag{1}$$

где $p_{пред}$ – это такое статическое давление дозвукового потока на срезе сопла, при котором удельное количество движения дозвукового потока становится равным действительному удельному импульсу сверхзвукового потока в пустоте и, в соответствии с решением системы уравнений динамической совместности для прямого скачка уплотнения в одномерном приближении, реализуются условия, при которых скачок уплотнения садится на срез сопла.

Условия, при которых возможна работа двигателя с ГДТ на режиме после запуска, определены при помощи предложенного для этой цели критерия $dp2$. Критерий $dp2$ показывает отличие между $p_{пред}$ и максимальной величиной давления, которая может привести к входу скачка уплотнения в сопло двигателя. Анализ особенностей течения продуктов сгорания в газодинамическом тракте ГДТ показал, что после запуска ГДТ максимальная величина давления, которая может привести к входу скачка уплотнения в сопло двигателя, является величина статического давления дозвукового потока в горле ГДТ, $p_{ст.г}$.

$$dp2 = p_{пред} - p_{ст.г} \tag{2}$$

Расчет $p_{ст.г}$ проведен исходя из предположения о равенстве статического давления потока на срезе диффузора и давления окружающей среды, что ха-

рактерно для дозвуковых потоков, и предположения о сохранении полного давления в горле ГДТ и диффузоре.

Исследование влияния геометрических размеров на совместную работу двигателя с ГДТ на режиме после запуска проведено при помощи критерия dp_2/p_n .

Результаты расчета, изменение отношения dp_2/p_n в зависимости от диаметра среза диффузора D_d относительно диаметра горла ГДТ d_g , d_d/d_g , представлены на рис. 1.

Из рис.1 следует, что с ростом D_d/D_g , величина dp_2/p_n увеличивается, поэтому допустимый диапазон регулирования двигателя по режиму в сторону понижения давления газов в камере сгорания также увеличивается. Начиная с $D_d/D_g=1,4$ в горле ГДТ реализуется звуковой режим, и дальнейшее увеличение D_d/D_g не приводит к росту dp_2/p_n .

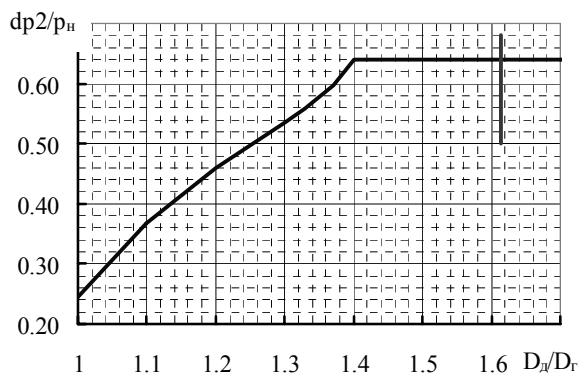


Рис. 1. Влияние диаметра диффузора на совместную работу двигателя с ГДТ на режиме после запуска, $dp_2/p_n = f(D_d/D_g)$

Вертикальной чертой обозначено значение dp_2/p_n при действительных размерах ГДТ, $D_d/D_g = 1,614$, которое используется при испытаниях РД-8. Из рис.1 следует, что при номинальных параметрах рабочего процесса в камере двигателя в горле ГДТ реализуется звуковой режим.

С целью определения минимального допустимого давления в камере сгорания на режиме глубокого дросселирования при помощи критериев dp_1 и dp_2 построены граничные кривые срыва ГДТ:

dp_1 – граничная кривая незапуска двигателя с ГДТ, которая позволяет определить минимальное допустимое давление в камере сгорания для осуществления запуска двигателя с ГДТ;

dp_2 – граничная кривая срыва ГДТ, которая позволяет определить минимальное допустимое давление в камере сгорания на режиме после запуска.

Исходными данными для построения граничных кривых являются результаты термогазодинамических расчетов полученных по программе [6] для $\kappa_m = 2,0, 2,1 \dots 3,0$ и $p_k = 45, 50 \dots 65$ бар: идеальный расходный комплекс $\beta_{ид}$, идеальный удельный импульс $I_{ид}$, газовая постоянная в камере сгорания двигателя R_k , газовая постоянная на срезе сопла двигателя R_a , показатель процесса расширения в камере и на срезе сопла двигателя, соответственно, x_k, x_a .

Действительные значения расходного комплекса β_d и удельного импульса I_d определены при помощи коэффициента расходного комплекса, который учитывает потери, возникающие из-за неполноты сгорания топлива, φ_β и, соответственно, коэффициента удельного импульса, учитывающего суммарные потери энергетике по камере сгорания, φ_i :

$$\beta_d = \beta_{ид} \cdot \varphi_\beta, \quad (3)$$

$$I_d = I_{ид} \cdot \varphi_i. \quad (4)$$

Значения β_d, I_d для номинальных параметров двигателя РД-8 ($p_k^{ном} = 78$ бар, $\kappa_m^{ном} = 2,4$) получены при помощи коэффициентов $\varphi_\beta^T = 0,9568$ и $\varphi_i^T = 0,9314$.

Сравнение результатов стендовых испытаний РД-8 (экспериментальные данные) с термогазодинамическими расчетами действительного процесса (теоретические данные) для $\kappa_m = 2,4$ и $p_k = 45, 50 \dots 65$ бар показало, что значения параметров β_d, I_d для этого двигателя зависят от p_k , причем экспериментальная зависимость отличается от теоретической.

Для того чтобы получить значения β_d и I_d , соответствующие экспериментальным данным, введены поправочные коэффициенты для $\varphi_\beta = f(p_k)$ и $\varphi_i = f(p_k)$:

$$\varphi_\beta = \varphi_\beta^T + D \left(\frac{d\varphi_\beta}{d p_k} \right) \cdot \frac{p_k - p_k^{ном}}{p_k^{ном}}, \quad (5)$$

$$\varphi_i = \varphi_i^T + D \left(\frac{dI_d}{dp_k} \right) \cdot \frac{p_k - p_k^{ном}}{I_{ид}}, \quad (6)$$

где $D \left(\frac{dv_d}{dp_k} \right), D \left(\frac{dI_d}{dp_k} \right)$ – разность между эксперимен-

тальными и теоретическими углами наклона характеристик $\beta_d = f(p_k), I_d = f(p_k)$, соответственно.

Так как $R_k, R_a, x_k, x_a, I_{ид}, I_d, \beta_{ид}, \beta_d$ также являются функциями p_k , то по результатам термогазодинамических расчетов построены зависимости $R_k = f(p_k), R_a = f(p_k), x_k = f(p_k), x_a = f(p_k), I_{ид} = f(p_k), I_d = f(p_k), \beta_{ид} = f(p_k), \beta_d = f(p_k)$ для каждого значения $k_m = 2...3$ с шагом 0,1. Эти зависимости позволяют определить $R_k, R_a, x_k, x_a, I_{ид}, I_d, \beta_{ид}, \beta_d$ для фиксированного значения k_m и любого p_k в диапазоне от 45 до 65 бар.

Кривая $dp1$ построена таким образом, что для каждого фиксированного значения k_m методом последовательных приближений определено такое значение p_k при котором $dp1=0, p_{пред} - p_n = 0$ следовательно скачок уплотнения садится на срез сопла и при более низком значении p_k запуск двигателя с ГДТ теоретически невозможен.

Кривая $dp2$ построена таким образом, что для каждого фиксированного значения k_m методом последовательных приближений определено такое значение p_k , при котором $dp2=0, p_{пред} - p_{ст.г}=0$, следовательно скачок уплотнения садится на срез сопла и при дальнейшем снижении давления в камере сгорания на режиме должен произойти срыв ГДТ.

На рисунке 2 представлены граничные кривые незапуска двигателя с ГДТ $dp1$ и срыва ГДТ на режиме после запуска $dp2$. Индексом $ид$ обозначены результаты расчета идеального процесса, без учета коэффициентов φ_β и φ_i , индексом $д$ обозначены результаты расчета действительного процесса, с учетом коэффициентов φ_β и φ_i . На рисунке 2 также представлены значения давлений в камере сгорания при различных величинах k_m , полученные при ОИ для нормальных испытаний и для испытаний со срывом ГДТ.

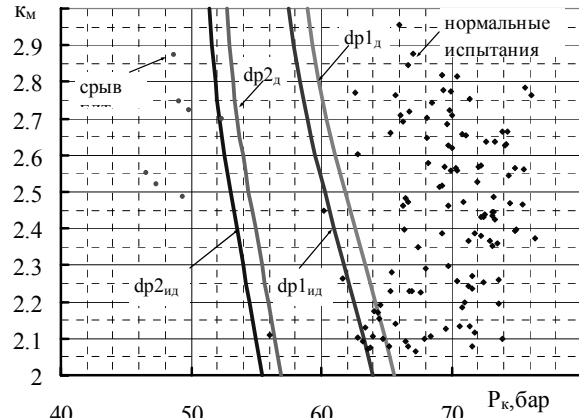


Рис.2. Граничные кривые запуска – срыва ГДТ

Из рис.2 следует:

- сравнение граничных кривых незапуска двигателя с ГДТ и срыва ГДТ на режиме после запуска с результатами стендовых испытаний РД-8 показало правомерность применения предложенных критериев, характеризующих возможность совместной работы двигателя и ГДТ;

- применение диффузора ГДТ позволяет уменьшить давление в горле ГДТ. Это дает возможность двигателю с ГДТ работать на режиме при понижении давления газов в камере сгорания на 15 – 20 % от величин, при которых запуск двигателя с ГДТ без потери вакуума в районе среза сопла невозможен;

- учет отличия энергетики действительного процесса от идеального (учет φ_β и φ_i) позволяет определить условия срыва ГДТ при дросселировании двигателя в большей мере соответствующие результатам экспериментов (~ 2,5 % по p_k).

Двигатель РД-120 отличается от РД-8 существенно большим давлением в камере сгорания ($p_k^{ном} = 166$ бар) при практически равной степени расширения. Минимальное давление в камере сгорания в процессе дросселирования этого двигателя $p_{k мин} = 141$ бар соответствует режиму конечной ступени. Расчеты, аналогичные проведенным для двигателя РД-8 показывают, что величины критериев

запуска ГДТ для этих режимов составляют $dp_1/p_{н\text{ ном}} = 1,6$ и $dp_1/p_{н\text{ мин}} = 1,21$. Из этого следует, что ГДТ для этого двигателя сможет запускаться не только номинальном режиме работы двигателя, но и на режиме конечной ступени. Поскольку программа дросселирования этого двигателя не предусматривает получение величины $dp_1/p_n < 0$, то применение кормового диффузора ГДТ для этого двигателя не является целесообразным, тем более, что при диаметре горла этого ГДТ $D_r=1,8$ м размеры эффективного диффузора для нее были бы весьма внушительными.

Вывод и перспективы дальнейших исследований в данном направлении

Проведено исследование влияния наличия кормового диффузора ГДТ и его геометрических размеров на возможность совместной работы двигателя с ГДТ на режиме по критериям возможности запуска ГДТ и возможности работы двигателя с ГДТ на режиме после запуска.

Представлена методология построения граничных кривых запуска – срыва ГДТ. Проведен сравнительный анализ граничных кривых запуска – срыва с результатами стендовых испытаний РД-8, который показал правомерность предложенной методологии.

Результаты проведенных работ могут быть использованы при обосновании возможности реализации требуемого диапазона регулирования по тяге на имеющемся стендовом оборудовании. Кроме того, представленная методология может быть использована как инструмент для формирования требований для разработки нового стендового оборудования с учетом требуемого диапазона регулирования двигателя. В частности, она позволяет обоснованно принять решение о целесообразности применения кормового диффузора в составе ГДТ.

Анализ результатов проходящих в настоящее время стендовых испытаний двигателя РД-861К с сопловыми насадками различной конфигурации в наземных условиях с ГДТ позволит сделать проверку основных теоретических положений представленной методологии.

Литература

1. Зукроу М.Дж. Реактивные двигатели. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1960. – 259 с.
2. Шишков А.А. Газодинамика пороховых ракетных двигателей. Инженерные методы расчета. – М.: Машиностроение, 1974. – 155 с.
3. Научно-технический отчет „Оценки и рекомендации по использованию существующей ГДТ для стендовых испытаний камеры двигателя к третьей ступени РН „Циклон-4”,...”. – М.: ФГУП „Исследовательский центр имени М.В. Келдыша”, 2004. –111 с.
4. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. – М.: Наука, 1976. – 244 с.
5. Научно-технический отчет № НТО 445-031/2007 „Анализ энергетических параметров потока продуктов сгорания на срезе сопел различных ЖРД для определения условий проведения наземных огневых испытаний”. Днепропетровск: ГКБ „Южное”, 2007. – 113 с.
6. Моделирование химических и фазовых равновесий при высоких температурах (Астра. 4/рс): Описание применения. – М.: МГТУ им. Баумана, 2000. –57 с.

Поступила в редакцию 15.05.2008

Рецензент: д-р техн. наук А.В. Климов, ГП Конструкторское бюро “Южное” им. М.К. Янгеля, Днепропетровск.