

УДК 621.454.2.035.5

Д.А. ШАМРОВСКИЙ, Н.В. КОРОЛЬКОВА*Государственное конструкторское бюро “Южное”, Днепропетровск, Украина***ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ПОТОКА ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ НА СРЕЗЕ СОПЕЛ РАЗЛИЧНЫХ ЖРД
С ЦЕЛЬЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСЛОВИЙ ПРОВЕДЕНИЯ
НАЗЕМНЫХ ОГНЕВЫХ ИСПЫТАНИЙ**

Проведено расчетно-экспериментальное исследование энергетических параметров потока продуктов сгорания на выходе из сопел двигателей, наземные испытания которых проходят в атмосфере без газодинамических труб (ГДТ), с ГДТ и в барокамере. Предложены критерии возможности запуска и совместной работы ГДТ и двигателя на режиме, которые позволяют на этапе проектирования сформировать комплекс требований по обеспечению условий для проведения стендовых испытаний.

ГДТ, барокамера, исследование, наземное огневое испытание, сверхзвуковой поток, дозвуковой поток, скачок уплотнения, безотрывное истечение потока, запуск двигателя

Введение

Постановка проблемы и ее связь с научно-практическими задачами. При проектировании ракетных двигателей одной из важных задач является определение условий проведения наземных (стендовых) испытаний, поскольку специальное стендовое оборудование для таких испытаний, как правило, разрабатывается одновременно с двигателями. Основное требование к стендовому оборудованию – это возможность обеспечения безотрывного истечения продуктов сгорания из сопла камеры двигателя. Большие технические сложности возникают при организации наземных испытаний высотных двигателей (предназначенных для работы в составе III – IV ступеней ракет носителей) из-за необходимости обеспечить низкое давление окружающей среды в районе среза сопла. Стендовое оборудование для наземных испытаний таких двигателей включает в себя, как правило, различные системы принудительного вакуумирования (эжекторы, вакуумные насосы и т.п.). Выбор характеристик таких систем зависит от энергетических параметров потока продуктов сгорания топлива на срезе сопла камеры двигателя.

Обзор публикаций и выделение нерешенных

задач. При организации стендовых испытаний высотных ракетных двигателей возможность применения газодинамических труб оценивается по минимальному допустимому давлению в камере сгорания рассматриваемого двигателя [1]. Исходными данными для такой оценки являются геометрические размеры сопла и результаты термогазодинамического расчета идеального процесса в камере сгорания при номинальном давлении. Минимальное давление в камере сгорания двигателя определяют по падению полного давления газов в прямом скачке уплотнения, исходя из предположения о том, что он расположен на срезе сопла в одномерном приближении [2] по соответствующим газодинамическим зависимостям [3] с учетом заданного противодавления. Возможность применения ГДТ определяется сравнением полученного минимального и номинального давления в камере сгорания.

В рассмотренном методологическом подходе не учитываются особенности действительного процесса горения и истечения, которые сопровождаются существенным снижением энергии потока. Кроме того, величина минимального допустимого давления в камере сгорания не позволяет учесть необ-

ходимое превышение номинального давления над минимальным с целью повышения надежности запуска ГДТ.

Постановка задачи данного исследования. Целью представленной работы является расчетно-экспериментальное исследование энергетических параметров потока продуктов сгорания на выходе из сопел различных двигателей для того, чтобы выработать комплекс требований к вновь проектируемому стендовому оборудованию или определить критерии возможности проведения испытания какого-либо двигателя с выбранным типом стендового оборудования. Расчетно-экспериментальные исследования выполнены для двигателей, испытываемых в атмосфере без ГДТ (РД170, РД855, РД856, РД261, РД262, РД263), испытываемых с ГДТ (РД120, РД8, РД862, РД861, РД858, РД859) и для двигателей, испытываемых в барокамере с дополнительными эжектирующими устройствами (РД866, РД864, РД869, РД868, 15Д280, 11Д75, УБ ДУ803, VEGA).

Изложение основного материала с обоснованием полученных научных результатов

Для оценки энергетических параметров потока продуктов сгорания на срезе сопла для каждого двигателя проведен термогазодинамический расчет идеального (теоретического) процесса [4], а также определены параметры продуктов сгорания, соответствующие действительному удельному импульсу по технической документации [5].

Из расчета следует, что полученные величины параметров торможения потока на срезе сопла, соответствующие действительному значению удельного импульса, в общем случае, значительно отличаются от результатов термодинамического расчета. Эти отличия указывают на снижение общей энергии потока, и должны быть учтены при дальнейших расчетах.

Возможность реализации безотрывного течения продуктов сгорания в сверхзвуковой части сопла

двигателя определена путем расчета условий возникновения скачка уплотнения на срезе сопла в одномерном приближении. В этом расчете определено такое давление окружающей среды p_n , при котором, вследствие решения системы уравнений динамической совместимости для прямого скачка уплотнения в одномерном приближении, на срезе сопла реализуются условия для возникновения скачка уплотнения. С учетом равенства весового расхода и полного теплосодержания потока до и после скачка уплотнения решение системы уравнений динамической совместимости сводится к определению условий, при которых удельный импульс дозвукового потока продуктов сгорания после скачка уплотнения $I_{доzv}$, становится равным действительному удельному импульсу I_0 сверхзвукового потока перед скачком.

Расчеты выполнены с учетом особенности дозвукового потока на срезе сопла, заключающейся в том, что после скачка уплотнения статическое давление в потоке $p_{ст}$ равно давлению окружающей среды p_n .

Удельный импульс дозвукового потока $I_{доzv}$ определен из системы уравнений динамической совместимости (закон сохранения массы, закон сохранения энергии, закон сохранения количества движения).

Решением этой системы является статическое давление дозвукового потока на срезе сопла, при котором удельный импульс дозвукового потока становится равным действительному удельному импульсу сверхзвукового потока и, следовательно, реализуются условия, при которых скачок уплотнения садится на срез сопла. Таким образом, с учетом соответствия статического давления и давления окружающей среды для дозвукового потока, полученное значение статического давления $p_{ст}$ является предельным ($p_{пред}$) для определения допустимой величины давления окружающей среды.

Чтобы оценить величину необходимого превышения $p_{пред}$ над p_n , предложен критерий возможно-

сти проведения испытания $dp1 = p_{пред} - p_n$ и рассмотрено его отношение к p_n , $dp1/p_n$.

Анализ результатов расчетов показал, что $p_{пред}$ для двигателей, испытания которых проходят с ГДТ без дополнительных эжектирующих устройств, несколько превышает уровень давления окружающей среды p_n . Вероятно, это связано с тем, что условия проведения испытаний были определены с учетом возможных отклонений параметров камер сгорания, определяемых настройкой или заданным диапазоном регулирования.

Из расчетов следует, что минимальная величина отношения критерия возможности проведения испытания к давлению окружающей среды ($p_n = 1,033 \text{ кгс/см}^2$) $dp1/p_n$ для двигателей, испытываемых в атмосфере без ГДТ, составляет 2,126, для двигателей, испытываемых с ГДТ, $dp1/p_n$ составляет 0,232, а для двигателей, испытываемых в барокамере с ГДТ и дополнительным эжектирующим устройством, $dp1/p_n < 0$.

По значению $dp1/p_n$ можно определить необходимые условия для проведения испытания двигателя:

- $dp1/p_n \geq 2,126$, свойственно двигателям, испытания которых проводятся в атмосфере, без ГДТ;
- диапазон величины $2,126 > dp1/p_n \geq 0,232$ характерен для двигателей, которые испытываются с ГДТ. Величина $dp1/p_n = 0,232$ является минимальной для этих двигателей и определяет минимальный проверенный запас превышения $p_{ст}$ над p_n , необходимый для надежного запуска ГДТ с учетом разброса характеристик и возможных особенностей предварительной настройки двигателя;
- если $dp1/p_n < 0$, то испытание двигателя необходимо проводить в барокамере с ГДТ и дополнительным эжектирующим устройством.

На основании проведенного анализа можно сделать вывод о том, что давление предварительного разрежения в барокамере $p_{н\text{ зап}}$ должно быть таким, чтобы величина $dp1/p_n$ была больше, чем $(dp1/p_n)_{\min}$

$= 0,232$.

Давление в барокамере необходимое для запуска двигателя и ГДТ может быть определено по формуле:

$$p_{н\text{ зап}} = p_{пред} / (1 + dp1/p_n).$$

Для обеспечения надежного запуска двигателя в барокамере с ГДТ и дополнительным эжектирующим устройством $dp1/p_n$ принято равным 0,232,

$$p_{н\text{ зап}} = p_{пред} / (1 + 0,232).$$

Сравнение величин $p_{н\text{ зап}}$ и давления предварительного разрежения в барокамерах $p_б$ показывает, что величина $p_{н\text{ зап}}$ иногда значительно превышает $p_б$. Это свидетельствует о том, что для проведения испытаний в барокамере давление предварительного разрежения выбирается со значительным запасом по сравнению с давлением, при котором должен происходить запуск ГДТ в соответствии с анализом энергетики потока. В то же время известно, что при проведении испытаний в барокамере (например, двигатель VEGA) этого запаса нет. При настройке на номинальное давление в камере сгорания двигателя VEGA запуск ГДТ происходит не всегда, поэтому для гарантированного запуска ГДТ двигатель настраивается на давление в камере сгорания на 20% больше номинального значения.

Из опыта проведения наземных стендовых испытаний высотных двигателей известно, что после успешного запуска двигателя с ГДТ появляется возможность регулирования двигателя по режиму в сторону понижения давления газов в камере сгорания до величин, при которых запуск двигателя с ГДТ без потери вакуума в районе среза сопла невозможен.

Анализ особенностей течения продуктов сгорания в газодинамическом тракте ГДТ показал, что после запуска ГДТ максимальным статическим давлением, которое может привести к входу скачка уплотнения в сопло двигателя, является давление звукового потока в горле ГДТ $p_{ст.г}$. Поэтому, критерием возможности работы двигателя с ГДТ на ре-

жиме после запуска принят $dp_2 = p_{пред} - p_{ст.г}$ и рассмотрено его отношение к p_n , dp_2/p_n .

Расчет давления в горле ГДТ проведен исходя из предположения о равенстве статического давления потока на срезе диффузора и давления окружающей среды, что характерно для дозвуковых потоков, и предположения о сохранении полного давления в горле ГДТ и диффузоре [5].

Если в результате расчета полного давления в диффузоре ГДТ получается, что $p_{0 ГДТ} = p_{0 ГДТ}^{кр}$, то в этом случае в горле ГДТ устанавливается звуковое истечение, т.е. происходит „запирание” ГДТ. Снижение p_n за счет, например, работы эжектирующих устройств, в этом случае, уже не приводит к изменению величин $p_{0 ГДТ}$ и $p_{ст.г}$.

Расчеты показывают, что величина dp_2/p_n в общем случае превышает величину dp_1/p_n . Это превышение обусловлено постоянством давления окружающей среды $p_n = 1,033 \text{ кгс/см}^2$, а анализ этой величины для двигателей, испытываемых при помощи принудительного эжектирования выхлопных газов затруднен из-за отсутствия замеров давления в газодинамических трактах между ГДТ и эжектирующими устройствами. Поэтому, для анализа требований к стендовому оборудованию при работе на режиме, величина dp_2/p_n принята равной величине $(dp_1/p_n)_{мин}$. Исходя из этого для двигателей, испытываемых в барокамере, определено требуемое рабочее давление за ГДТ $p_n^{рабоч}$. Из расчета следует, что после запуска двигателя давление за ГДТ может быть несколько повышено.

По методикам, представленным в [2] и [6] определено давление окружающей среды, при котором истечение продуктов сгорания будет безотрывным.

Расчеты показали, что давление отрыва для всех двигателей, которые проходят испытания без ГДТ, превышает атмосферное давление, за исключением двигателя РД262. Поскольку при испытаниях двигателя РД262 отрыв потока не наблюдается, можно сделать вывод о том, что зависимость для $p_{отрыва}$

позволяет определить эту величину с некоторым запасом ($\sim 0,09 \text{ кгс/см}^2$). Сравнение расчетного давления отрыва с давлением предварительного давления в барокамере для высотных двигателей показывает, что они близки. Это позволяет сделать вывод о том, что, вероятно, давление предварительного разрежения в барокамере назначалось исходя из результатов анализа величины давления отрыва потока на срезе сопла. Анализ соотношений давлений при запуске ГДТ для двигателей, испытываемых с ГДТ в атмосфере, указывает на то, что давление предварительного разрежения в барокамере может быть существенно повышено при соответствующей организации стыковки среза сопла и фланца ГДТ (за счет установки плавающих колец, обеспечения малых зазоров и т. п.).

Вывод и перспективы дальнейших исследований в данном направлении

Проведена расчетная оценка энергетических свойств потока продуктов сгорания на срезе сопел различных двигателей с целью определения характеристик стендового оборудования для проведения наземных испытаний высотных ЖРД. В качестве критерия, характеризующего возможность успешного запуска ГДТ предложено использовать отношение разности предельного давления входа скачка уплотнения в сопло и давления окружающей среды к давлению окружающей среды перед запуском ($dp_1/p_n = (p_{пред} - p_n)/p_n$).

В качестве критерия, характеризующего возможность срыва ГДТ после выхода на режим предложено использовать отношение разности предельного давления входа скачка уплотнения в сопло и статического давления дозвукового потока в горле ГДТ к давлению окружающей среды за ГДТ на режиме ($dp_2/p_n = (p_{пред} - p_{ст.г})/p_n$). Отличие величин $p_{ст.г}$ и p_n обусловлено работой диффузора ГДТ и может быть значительным. При расчете критериев возможности запуска и срыва ГДТ следует учиты-

вать, что давление окружающей среды за ГДТ перед запуском двигателя и после выхода на режим в случае применения эжектирующих устройств могут заметно отличаться.

Проведенная оценка энергетических особенностей потоков продуктов сгорания показала, что при $dp1/p_n \geq 2,126$, испытание двигателя можно проводить в атмосфере, без ГДТ. При $2,126 > dp1/p_n \geq 0,232$, испытание двигателя необходимо проводить с ГДТ, причем $dp1/p_n = 0,232$ – это минимальная проверенная величина, при которой с достаточной степенью надежности осуществляется запуск ГДТ с обычным для ЖРД разбросом настройки по режиму. Если определенное при $p_n = 1,033 \text{ кгс/см}^2$, $dp1/p_n < 0$, то это значит, что для проведения испытания этого двигателя необходимо использовать барокамеру с устройством принудительного вакуумирования. При этом давление предварительного разрежения (перед запуском двигателя) p_n с целью обеспечения запуска ГДТ в проверенном диапазоне, следует выбирать из условия $dp1/p_n \geq 0,232$. Эжектирующее устройство для испытаний двигателя следует подбирать с такой производительностью, чтобы после запуска двигателя давление за ГДТ не превысило уровень, определяемый условием $dp2/p_n \geq 0,232$.

Анализ соотношения величины давления отрыва потока продуктов сгорания на срезе сопел различных двигателей и давления предварительного разрежения в барокамерах позволил сделать предположение о том, что давление предварительного разрежения было выбрано исходя из условия обеспечения безотрывного истечения продуктов сгорания после запуска двигателя. Анализ условий запуска двигателей с ГДТ показывает, что при соответствующей организации стыковки камеры двигателя и верхнего фланца ГДТ (за счет установки плавающих колец,

обеспечения малых зазоров и т.п.) давление предварительного разрежения может быть существенно повышено.

Литература

1. Массье П., Рошке Е. Экспериментальное исследование выхлопных диффузоров для ракетных двигателей // В кн. Исследование ракетных двигателей на жидком топливе. – М.: Мир, 1964. – С. 96-109.
2. Научно-технический отчет „Оценки и рекомендации по использованию существующей ГДТ для стендовых испытаний камеры двигателя к третьей ступени РН „Циклон-4”,...”. ФГУП „Исследовательский центр имени М.В. Келдыша”. – М., 2004. – 111 с.
3. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. – М.: Наука, 1976. – 488 с.
4. Моделирование химических и фазовых равновесий при высоких температурах (Астра. 4/рс): Описание применения. – М.: МГТУ им. Баумана, инв. 445/1324. – 57 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...”. – ГKB „Южное”, Днепропетровск, 2007. – 13 с.
6. Комплекс программ расчета равновесных течений газа в сверхзвуковых соплах – «Consor». Описание математической модели и алгоритма расчета.

Поступила в редакцию 23.05.2007

Рецензент: д-р техн. наук А.В. Климов, ГKB „Южное”, Днепропетровск.