

Регулирование высотности сопла с большой степенью расширения

В.В. Семенов

Предложен способ существенного повышения эффективности работы высотного сопла в земных условиях путем регулирования его высотности за счет устройства кольцевой щели на сверхзвуковой части. Приводятся результаты испытаний щелевого сопла на дифференциальной установке на режимах перерасширения. Показано, что результаты огневых испытаний щелевого сопла хорошо совпадают с экспериментальными данными, полученными при холодных его продувках сжатым воздухом. Определены оптимальные размеры кольцевой щели и ее местоположение на сверхзвуковой части круглого сопла. Установлено, что при организации нескольких кольцевых щелей в сверхзвуковой части высотного сопла диапазон изменения внешнего давления, при котором сохраняется положительный эффект, значительно расширяется.

По мере развития и совершенствования ракетно-космической техники растут требования, предъявляемые к эффективности ракетного двигателя. Эффективный двигатель должен, прежде всего, иметь максимальный удельный импульс при минимальных массе и габаритах. Среди большого числа факторов, от которых зависят удельный импульс, габариты и масса двигателя, важную роль играет реактивное сопло.

При жестком, нерегулируемом сопле с, так называемой, оптимальной высотностью максимальный средний по траектории удельный импульс будет достигнут тогда, когда давление на срезе сопла выбрано равным некоторому среднему по траектории полета атмосферному давлению. Однако и в этом случае потери, вызываемые атмосферным противодавлением, все же остаются еще значительными, так как фактически сопло работает на нерасчетных режимах.

Наибольший средний по траектории удельный импульс будет иметь только двигатель, снабженный соплом с идеально регулируемой высотностью. Однако создание такого сопла встречает большие конструктивные трудности, и его пока нет на практике.

Одним из перспективных решений регулирования высотности сопла является применение схемы высотного щелевого сопла, в котором организован специальный разрыв контура в сверхзвуковой части в виде узкой кольцевой щели. Во время работы двигателя на старте ракеты вблизи Земли атмосферное давление воздействует через узкую кольцевую щель на поток в сопле, вызывая принудительный отрыв газа от его стенок. Благодаря отрыву потока газа, в сопле не происходит перерасширения газа, и сопло работает близко к расчетному режиму. Причем, конструкция щелевого сопла не слишком усложняется. Поэтому представляется целесообразным провести широкое исследование тяговых характеристик щелевого сопла и разработать рекомендации для практического его использования.

Разрабатывая и исследуя сопла с изменяемой в полете высотностью, необходимо оценить эффективность двигателя с такими соплами. Очевидно, главным показателем эффективности двигателя является степень его влияния на конечную скорость ракеты носителя (РН). Изменение высотности сопла будет сказываться, прежде всего, на идеальную скорость $V_{ид}$ и потери скорости из-за воздействия атмосферного давления ∇V_H .

Если исходить из действующих сил, движение РН в данном случае можно описывать известным соотношением И.В. Мещерского:

$$M dV / dt = P_H - gM \sin \theta - X_C \quad (1)$$

где V – текущая скорость полета РН; M – текущая масса РН; θ – угол наклона вектора скорости к горизонту; X_C – аэродинамическое сопротивление; P_H – тяга двигателя на данной высоте H . Представим тягу и аэродинамическое сопротивление в виде $P_H = P_{II} - F_A p_H$; $X_C = c_x q F_M$, где P_{II} – тяга в пустоте; $q = \rho V^2 / 2$ – скоростной напор на высоте H ; F_M , F_a – площади миделя корпуса РН и среза сопла двигателя; C_x – аэродинамический коэффициент лобового сопротивления (функция формы РН и числа Маха M). Подставляя эти соотношения в (1) и решая уравнение относительно дифференциала скорости, получаем:

$$dV = \frac{P_{II}}{M} dt - \frac{F_a P_H}{M} - g \sin \theta dt - C_x q \frac{F_M}{M} dt \quad (2)$$

Введем соотношения: $\mu = M / M_H$ – относительная масса РН, M_H – начальная масса ракеты; $\mu = 1 \dots \mu_K$, то есть $\mu = 1$ – начальное и $\mu = \mu_K$ – конечное значение относительной массы;

$\dot{m} = dM/dt$ – секундный расход массы, то есть секундный расход топлива. Кроме того,

воспользуемся соотношениями $P_H = \dot{m} J_H$; $P_{II} = \dot{m} J_{II}$, где J_H и J_{II} – удельный импульс на

высоте H и в пустоте: $J_H = J_{II} - c_* F_a p_H \xi_K$. $\bar{F}_a = F_a / F_{кр}$ – относительная площадь среза

сопла; $n = P_{H=0} / q M_H$ – начальная тяговооруженность РН; $\dot{m} = p_K \varepsilon_K \bar{F}_{кр} / P_H$ выражение

секундного расхода через параметры двигателя: p_K – давление в камере сгорания; c_* –

характеристическая скорость, зависящая от рода топлива и плотности в камере сгорания; ε_K –

коэффициент, учитывающий падение полного давления по камере сгорания, характеристика ее

формы. $P_M = n M_H / F_M$ – начальная поперечная нагрузка.

Используя эти соотношения, можно записать составляющие уравнения (2) в виде

$$c_x q \frac{F_M}{\mu} dt = -c_x q \frac{F_M}{\dot{m}} \frac{d\mu}{\mu} = -c_x q \frac{J_{H=0}}{P_M n} \frac{d\mu}{\mu}$$

$$\frac{P_G}{M} dt = \frac{J_{\Pi} m^*}{M_H \mu} dt = -J_{\Pi} \frac{d\mu}{\mu}$$

$$\frac{F_A p_H}{M} = \frac{F_A p_H}{M \mu} dt = -\frac{F_A p_H}{m^*} \frac{d\mu}{\mu} = -c_* F_A \frac{\bar{p}_H}{p_H \varepsilon_K} \frac{d\mu}{\mu}$$

$$g \sin \theta dt = -g \sin \frac{M_H}{m^*} d\mu = \frac{J_{H=0}}{n} \sin \theta d\mu;$$

Подставляя эти соотношения в уравнение (2) и интегрируя в пределах от $\mu = 1$ до $\mu = \mu_K$, получаем соотношение $V_K = V_{u0} - \nabla V_H - \nabla V_{\theta} - \nabla M_C$, (3) где $V_{ид} = J_{\Pi} \ln 1 / \mu_K$ - идеальная скорость РН; ∇V_H - потери скорости из-за воздействия атмосферного давления на удельный импульс двигателя:

$$\nabla V_H = \frac{F_A c_*}{p_K \varepsilon_K} \int_{\mu_K}^1 \frac{p_H}{\mu} d\mu = (J_{\Pi} - J_{H=0}) \int_{\mu_K}^1 \frac{p_H}{p_{H=0}} \frac{d\mu}{\mu}$$

(это соотношение верно, если в полете $p_K = \text{const}$); V_{θ} - потеря скорости из-за земного

тяготения, то есть гравитационные потери: $\nabla V_g = \frac{J_{H=0}}{n} \int_{\mu_K}^1 \sin \theta d\mu$ ∇V_C - потери скорости

из-за аэродинамического сопротивления: $\nabla V_C = \frac{J_{H=0}}{P_M n} \int_{\mu_K}^1 c_X q \frac{d\mu}{\mu}$

Используя эти выражения, можно по соотношению (3) вычислить конечную скорость РН при тех или других изменениях характеристик двигателя, например, при изменении высотности сопла в полете. Изменение высотности сопла будет сказываться непосредственно на первых двух составляющих: $V_{ид}$ и ∇V_H . Например, пусть изменение высотности сопла происходит в момент, когда относительная масса ракеты получает значение μ_1 . Таким образом, на участке полета от $\mu = 1$ до $\mu = \mu_1$ имеем:

$$V_{u01} = J_{n1} \ln 1 / \mu_1 \dots \dots \dots \nabla V_H = \frac{F_{A1} c_*}{p_K \varepsilon_K} \int_{\mu_1}^1 \frac{p_H}{\mu} d\mu = (J_{\Pi} - J_{H=0})_{F_{A1}} \int_{\mu_K}^1 \frac{p_H}{p_{H=0}} \frac{d\mu}{\mu}$$

На следующем участке полета ракеты от $\mu = \mu_1$ до $\mu = \mu_K$

$$V_{u02} = J_{\Pi 2} \ln \mu_1 / \mu_K$$

будем иметь:

$$\nabla V_H = \frac{F_{A2} c_*}{p_K \varepsilon_K} \int_{\mu_K}^{\mu_1} \frac{p_H}{\mu} d\mu = (J_{\Pi} - J_{H=0})_{F_{A2}} \int_{\mu_K}^{\mu_1} \frac{p_H}{p_{H=0}} \frac{d\mu}{\mu} \quad \text{Если высотность}$$

сопла изменяется больше одного раза, то и число участков соответственно будет больше. По приведенной методике была проведена оценка эффективности щелевого сопла с разной степенью расширения для двигателя I-ой ступени. Изменение высотности сопла достигалась путем организации кольцевой щели на сверхзвуковой части сопла. На рис. 1а показан прирост конечной скорости ракеты при установке на двигатель первой ступени высотного щелевого сопла, имеющего одну кольцевую щель. Здесь по оси абсцисс отложено давление на срезе сопла. Щель расположена в сечении сопла с давлением $P_{щ} = 0.65 \times 10^5$ Па. Как видно, чем больше степень расширения сопла, тем заметнее прирост конечной скорости ракеты. Например, замена щелевого высотного сопла с давлением на срезе $P_a = 0.3 \times 10^5$ Па на такое же сопло с давлением на срезе $P_a = 0.1 \times 10^5$ Па дает выигрыш в скорости $\nabla V_k = 350$ м/с.

Влияние высотности сопла на конечную скорость РН

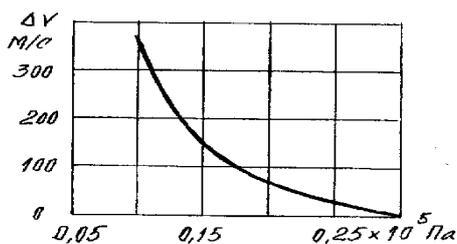


Рис.

Влияние положения щели на конечную скорость РН

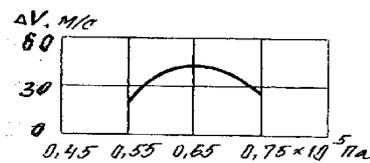


Рис.

С другой стороны, в каждом случае можно найти «оптимальное» положение щели, определяющее высотность щелевого сопла на первом участке полета ракеты. На рис. 1б показано, что при конечной высотности щелевого сопла $P_a = 0.2 \times 10^5$ Па «оптимальное» расположение щели соответствует $P_{щ} = 0.65 \times 10^5$ Па. Оптимизация расположения кольцевой щели в сверхзвуковой части щелевого сопла дает прирост конечной скорости $\nabla V_k = 30$ м/с. Эти расчеты показали, что, с одной стороны, предлагаемая схема расчета конечной скорости полета ракеты достаточно «чувствительна» к изменениям характеристик двигателя и, с другой стороны, щелевые сопла с изменяемой высотностью заслуживают самого пристального внимания и изучения. Снижение потерь тяги высотного сопла на нерасчетных режимах работы можно добиться путем уменьшения участка перерасширения потока газа за счет повышения давления газа на участке сопла за сечением отрыва потока.

Следует заметить, что щелевое сопло принципиально отличается от эжекторного сопла. Так, у эжекторного сопла во входной части (в смесительной камере) специально создается разрежение основным потоком, без которого немислима эжекция газа. Тогда как у щелевого высотного сопла

на нерасчетных режимах его работы снимается перерасширение газа путем передачи атмосферного давления внутрь сопла через кольцевую щель, в результате чего улучшаются тяговые характеристики сопла [1].

Наличие узкой кольцевой щели в расширяющейся части сопла приводит к некоторой задержке скачка на передней кромке щели, благодаря которой на нерасчетных режимах работы сопла происходит уменьшение перерасширения газа, в результате чего на этих режимах улучшаются тяговые характеристики сопла.

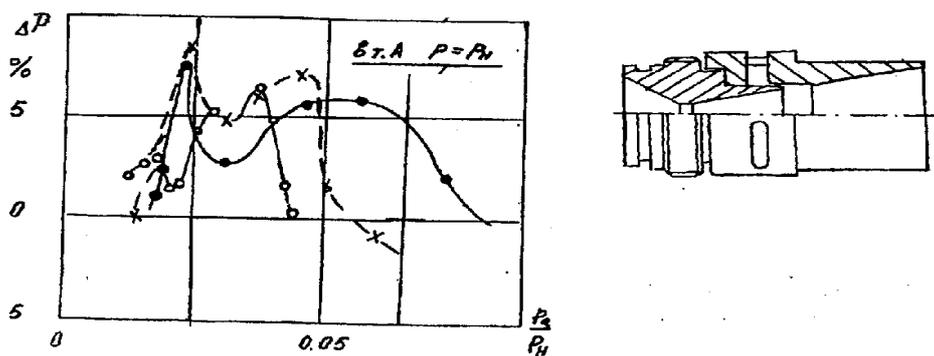
Следует заметить, что положительный прирост тяги, создаваемый щелевым соплом, начнется с момента, когда скачок уплотнения выйдет на переднюю кромку щели и будет наблюдаться до тех пор, пока давление потока газа в сечении, где расположена щель, не станет больше давления окружающей среды. Для определения диапазона изменения давлений в камере, при котором наблюдается прирост тяги, необходимо знать момент начала отрыва потока от кромки щели, когда система скачков уплотнения с кромки щели начинает уходить в глубь сопла, то есть предельную степень перерасширения. Так как диаметр (площадь) сечения, где расположена щель, известен, то давление в камере, при котором скачок уплотнения будет находиться на кромке щели, приближенно можно определить из уравнения $P_0 = 0.713P_H / \pi(\lambda_1)^{0.833}$ [2], где $\pi(\lambda_1)$ определяется через $q(\lambda_1) = F_{кр} / F_1$ по таблицам газодинамических функций. А давление в камере, при котором прирост тяги переменит свой знак, найдется из уравнения $P_0 = P_H / \pi(\lambda_1)$

Для изучения тяговых характеристик щелевых сопел в качестве объектов исследования были выбраны круглые конические сопла. При этом учитывалось, что основные результаты, полученные на конических соплах, будут справедливыми и для профилированных сопел. Основная часть экспериментов была выполнена на соплах с $\beta_A = 12^\circ$, $D_a = 36$ мм и $D_{кр} = 10$ мм. Сопла были рассчитаны на число Маха $M_a = 4,18$. Испытания щелевого сопла проводились на дифференциальной установке, предназначенной для определения потерь тяги в реактивных соплах. На экспериментах изменение внешнего давления имитировалось изменением давления в камере. В этом случае в ходе эксперимента изменяется отношение P_a/P_n , которое и определяет режимы работы сопла. Рассмотрим результаты некоторых экспериментов.

На рис. 2 приведено влияние формы щели (находятся ли они перпендикулярно или параллельно оси сопла) на прирост тяги. Видно, что при одинаковых размерах обе щели дают один и тот же максимум прироста тяги 5 – 5.5%. Однако диапазон изменения давления, при котором наблюдается прирост тяги, значительно шире у щели с параллельными оси сопла стенками. Чтобы сравнение велось при равных условиях, у обеих щелей высота уступов была одинаковой. Видно, что щель с перпендикулярными стенками даже при наличии уступа оказалась

менее эффективной, чем щель с параллельными стенками. Это объясняется тем, что кольцевой уступ, возникающий при организации щели с параллельными стенками, намного больше уступа у щели с перпендикулярными стенками. Вследствие этого скачок уплотнения намного дольше задерживается на кромке щели с параллельными стенками, препятствуя тем самым перерасширению газа в сопле.

Влияние формы щели на прирост тяги



На рис. 3 показана зависимость прироста тяги от положения щели по длине сверхзвуковой части сопла. Видно, что чем дальше расположена щель от горла сопла, тем шире диапазон изменения давления, при котором наблюдается прирост тяги. Это объясняется тем, что чем ближе расположена щель к выходному сечению, тем больше степень перерасширения газа в сопле.

Влияние положения щели на прирост тяги

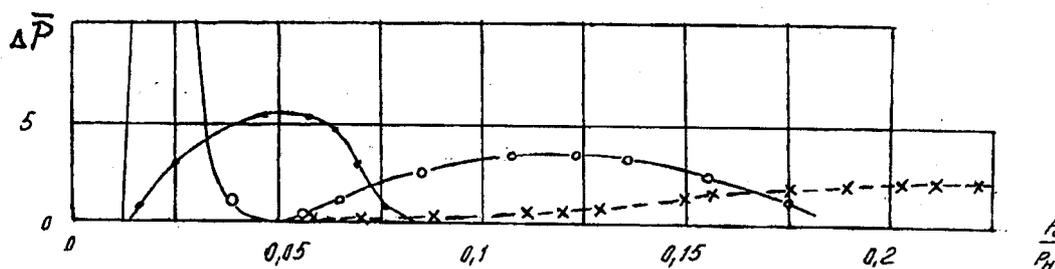


Рис.

Положительный эффект особенно долго сохраняется в сопле со смещенным контуром (рис. 4). Это объясняется тем, что при повышении давления газа на кромке щели больше атмо-сферного, в сопле у кромки щели происходит дальнейшее расширение и поворот сверхзвукового потока (течение Прандтля - Майера). Наконец, наступает момент, когда донная область замыкается, то есть происходит перестройка течения газа в сопле. Струя из сопла начинает «прилипать» к

поверхности стенки за разрывом контура. В этом случае скачок уплотнения будет находиться на участке сопла за щелью. Происходит снижение давления газа за щелью, в результате происходит некоторая эжекция атмосферного воздуха через узкую кольцевую щель.



Видно, что смещение контура практически не влияет на величину прироста тяги, которая составляет 6 – 7%. Однако в сопле со смещенным контуром диапазон изменения давления, при котором реализуется прирост тяги, значительно шире. Для выявления влияния на прирост тяги передачи атмосферного давления внутрь сопла, были проведены эксперименты при закрытой с внешней стороны сопла щели. Видно, что при смещенном за щелью контуре передача атмосферного давления через щель внутрь сопла оказывает слабое влияние на прирост тяги. Физически это объясняется тем, что на этих режимах работы щелевого сопла статическое давление на участке сопла за щелью близко к давлению окружающей среды, то есть донная область за уступом на этих режимах работы сопла открыта. Поэтому на этих режимах работы щелевого сопла воздух из атмосферы практически не поступает через кольцевую щель в зону отрыва потока газа в сопле. Положительный прирост тяги условно можно представить в виде суммы двух слагаемых $\nabla P = \nabla P_1 + \nabla P_2$, где ∇P_1 - прирост тяги, создаваемый уступом, ∇P_2 - прирост тяги, создаваемый путем передачи атмосферного давления внутрь сопла в зону пониженного давления. Подводя итог вышесказанному, следует заметить, что на начальном этапе работы щелевого сопла (когда скачок уплотнения находится на кромке щели) основной вклад в выигрыше тяги вносит уступ. Однако в районе максимальных значений прироста тяги (когда через щель идет некоторая эжекция атмосферного воздуха) заметный вклад в тягу вносит передача через щель атмосферного давления внутрь сопла (рис. 6).

Этот вывод подтверждается результатами дренажных испытаний. Соотношение между слагаемыми ∇P_1 и ∇P_2 в сильной степени зависит от относительного размера уступа.

Чем больше высота уступа h_v , тем меньшую роль в создании прироста тяги играет передача атмосферного давления внутрь сопла, так как в этом случае донная область за щелью будет долго оставаться открытой и давление в ней будет близким к атмосферному.

Результаты измерения статического давления на участке сопла за щелью представлены на рис. 5. Видно, что при давлении газа $P_0 < 1,5$ МПа наличие щели слабо влияет на распределение давления по длине сопла. Это объясняется тем, что донная область за щелью остается еще открытой. Однако после того как в щелевом сопле донная область за уступом замыкается, влияние участка сопла за щелью становится значительным. Так, заметно понижается давление на участке сопла за щелью.

Распределение давления по длине сопла

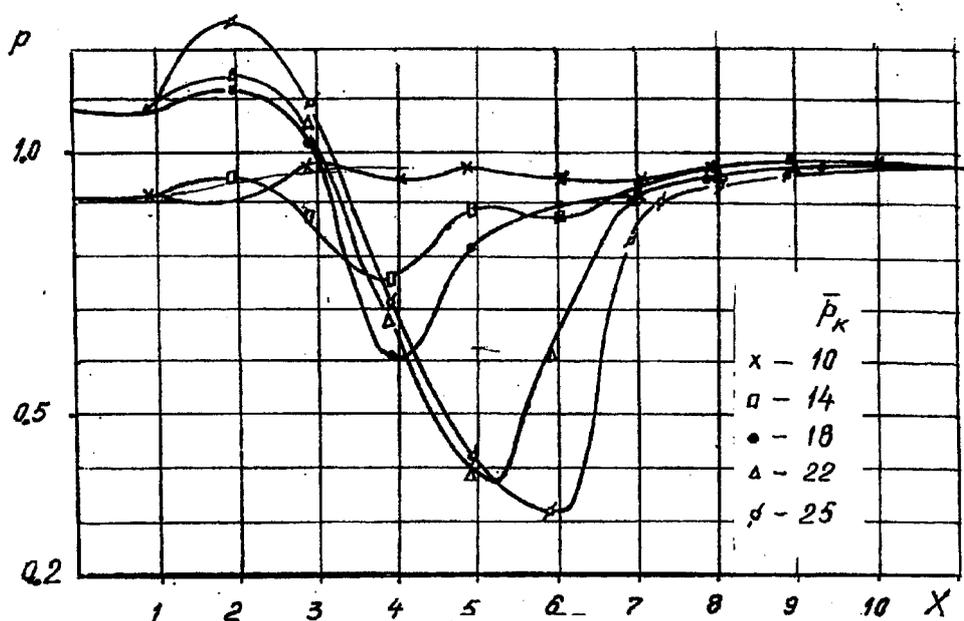


Рис.

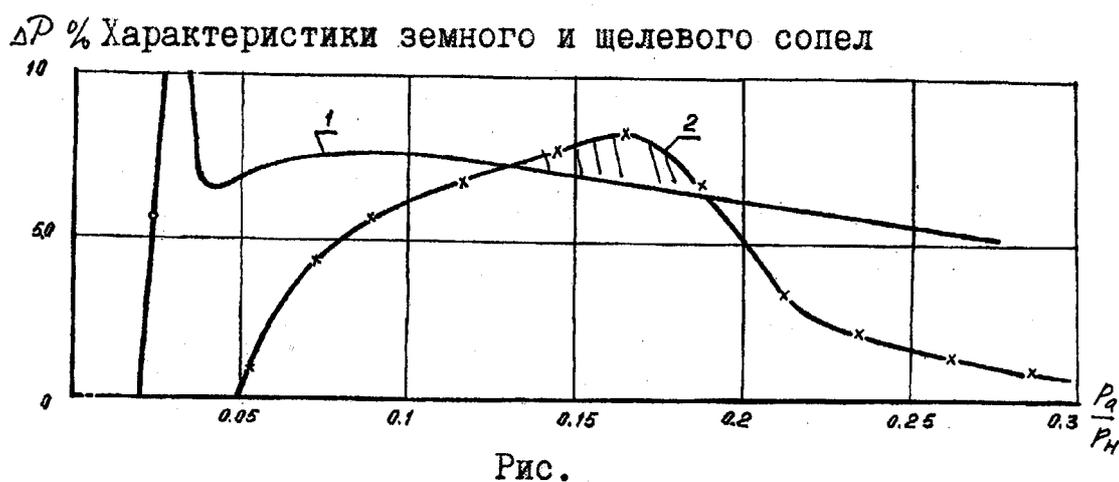
Если в гладком высотном сопле при его работе на режимах перерасширения скачок уплотнения постепенно перемещается к выходному сечению, то в щелевом сопле на режимах перерасширения из-за разрыва его контура скачок на какое-то время задерживается на кромке щели. Затем через некоторое время скачок сразу перескакивает некоторый участок сопла за щелью. После перестройки течения в донной области, когда скачок уплотнения вышел из щели, на участке сопла за щелью происходит заметное снижение давления до сечения отрыва, вызванное перерасширением газа в сопле и наличием донной области.

Потери тяги, возникающие из-за плохого восстановления давления на участке сопла за уступом, можно снизить путем передачи атмосферного давления внутрь сопла через отверстия, образованные по периметру в разных сечениях участка сопла за уступом. Результаты измерения прироста тяги в щелевом сопле, содержащем кольцевую щель и два пояса отверстий, показаны на

ни рис. 6, кривая 2. Показано, что в интервале изменения давления $p_a/p_n = 0,05 - 0,12$ перераширение газа в сопле снимается и прирост тяги достигает 8 %. С организацией двух поясов отверстий на участке сопла за щелью значительно уменьшается сопротивление этого участка.



Сравнение результатов измерения прироста тяги в сопле без насадка и влияния ширины щели на прирост тяги приведены рис. 7, кривая 1 (Участок сопла за щелью отсутствует). Видно, что изменение ширины щели в пределах $P_a/P_n = 0,1 - 0,2$ при сохранении высоты уступа практически не влияет на прирост тяги. Это объясняется тем, что на этих режимах работы сопла донная область за уступом открыта. В этом случае воздух из атмосферы практически не поступает через щель внутрь сопла. Однако с увеличением ширины щели щелевое сопло за счет эжекции воздуха создает большую тягу, чем сопло, работающее близко к расчетному режиму.



С увеличением ширины щели эжекция воздуха возрастает, в результате чего увеличивается максимальный прирост тяги и значительно удлиняется интервал изменения давления, при котором сохраняется положительный эффект (рис. 7, кривая 2). При соответствующем увеличении

ширины щели может наступить момент, когда тяга щелевого сопла на некоторых режимах работы может превышать тягу гладкого сопла, работающего близко к расчетному режиму. При дальнейшем повышении давления газа на кромке щели наступает автомодельный режим обтекания кромки. Для снижения потерь тяги, возникающих на расчетном режиме работы сопла из-за истечения продуктов сгорания через щель в атмосферу, размер щели желательно выбрать как можно меньше, например, можно принять $P_a/P_n = 0,2 - 0,4$.

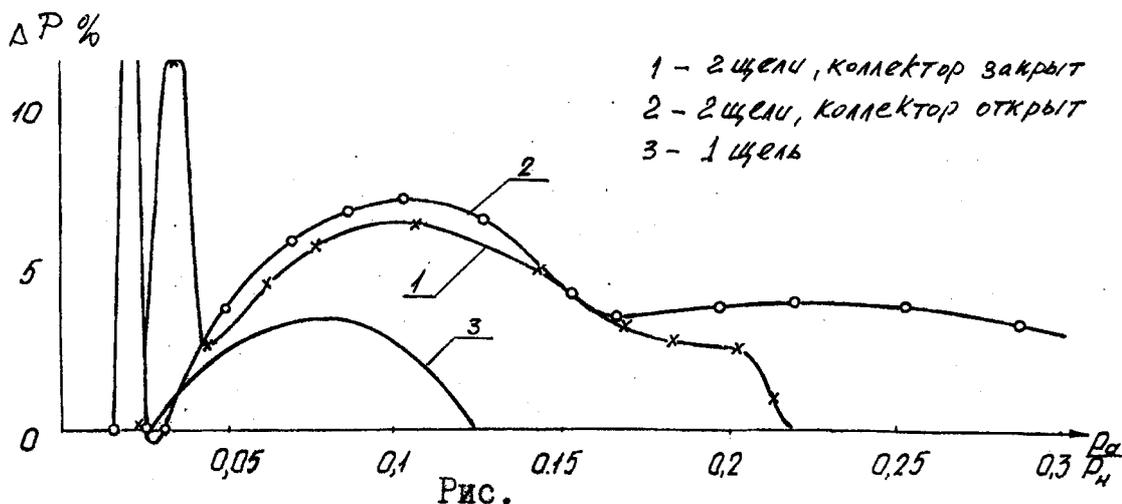
Для подтверждения результатов испытаний щелевых сопел на дифференциальной установке, работающей на воздухе, были проведены еще и огневые испытания. Результаты огневых испытаний щелевого сопла показали, что прирост тяги составляет 8% от идеальной тяги или 14% от действительной тяги двигателя, что хорошо согласуется с экспериментальными данными, полученными при холодном испытании щелевого сопла (рис. 6, звездочка).

Максимальный выигрыш тяги 15 - 20% получен при работе щелевого высотного сопла на режиме глубокого перерасширения газа, когда имеется большое противодавление (рис. 2). Причем этот прирост тяги наблюдается при наличии уступа в любом сечении расширяющей части сопла. Известно, что сверхзвуковая скорость течения в сопле наступает при перепаде давления для $K=1,4$ $\pi(\lambda) < 0,52828$. А при давлении в камере $P_0/P_n = 2,7$ наступает предельно возможное близкое к критическому сечению расположение скачка уплотнения в сопле (другими словами, на этом режиме работы сопла происходит первоначальный отрыв сверхзвукового потока газа от стенок сопла). Так как на уступе не происходит восстановления давления газа, то давление на передней кромке уступа будет таким же, как и в конце уступа. Разный характер восстановления давления в сопле после отрыва и дает нам прирост тяги при давлении в камере $P_0/P_n = 2.7$. Самое лучшее восстановление давления происходит у короткого сопла. Поэтому и прирост тяги у него получается максимальный.

Представляет практический интерес схемы щелевых сопел с несколькими кольцевыми щелями, расположенными по длине сверхзвуковой части сопла. На рис. 8 (кривая 1) приведены результаты испытаний сопла, имеющего две щели. Показано, что при наличии двух щелей диапазон изменения внешнего давления, при котором наблюдается прирост тяги, существенно шире. Тяговые характеристики сопла с двумя щелями значительно улучшаются, когда коллектор соединен с атмосферой (рис. 8, кривая 2). Так, начиная с давления $P_A = 0,16$ прирост тяги составляет 4%, хотя при закрытом коллекторе здесь имели место потери тяги. Это объясняется тем, что когда коллектор открыт, то каждая щель работает автономно, и снижение давления газа в коллекторе не происходит. А когда при работе второй щели коллектор изолирован, на первой щели происходит заметное снижение давления. Поэтому поступление газа в коллектор через первую щель

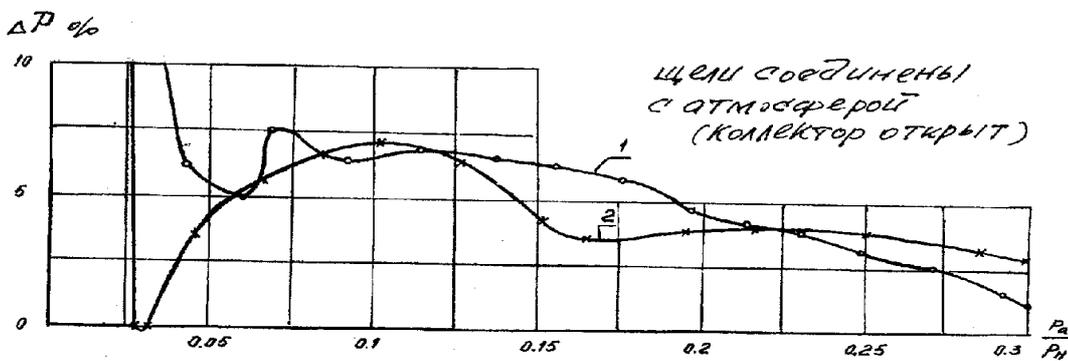
затруднено. Следовательно, давление газа в коллекторе будет меньше атмосферного, и поэтому скачок уплотнения долго не будет задерживаться на кромке второй щели.

Характеристики сопла с 2мя щелями



Высотное сопло с двумя кольцевыми щелями и смещенным за каждой щелью контуром в интервале изменения давления $P_a/P_n = 0.0 - 0.27$ работает значительно лучше, чем сопло с двумя щелями, но без смещения контура (рис. 9). После наступления автотельного режима работы щелевого сопла, смещенные части контура следует сдвинуть так, чтобы контур стал гладкий.

Характеристики сопла без смещения и со смещением контура



На основании проведенных исследований можно сделать следующий вывод:

1. Предложен способ существенного повышения эффективности работы сопла в земных условиях путем снятия перерасширения за счет перепуска атмосферного воздуха через кольцевую щель, расположенную в сверхзвуковой его части. Испытания на дифференциальной установке щелевого сопла без учета влияния внешнего потока на его работу показали, что организация кольцевой щели улучшает тяговые характеристики при его работе на режимах перерасширения.

2. Выявлено влияние различных геометрических параметров кольцевой щели на прирост

тяги:

- наличие кольцевой щели с параллельными оси сопла стенками расширяет диапазон изменения внешнего давления, при котором сохраняется положительный эффект;

- организация на участке сопла сразу за кольцевой щелью двух поясов отверстий значительно повышает тяговые характеристики сопел в широком диапазоне изменения внешнего давления.

- при организации нескольких кольцевых щелей в сверхзвуковой части высотного сопла диапазон изменения внешнего давления, при котором сохраняется положительный эффект, значительно расширяется.

3. Показано, что организация разрыва контура сопла на участке с давлением меньше атмосферного или смещение контура за уступом оказывает существенное влияние на прирост тяги и способствует организации направленного раннего отрыва потока внутри сопла. При этом на режимах перерасширения тяговые характеристики высотного сопла улучшаются как за счет разрыва контура, так и за счет перепуска через кольцевую щель атмосферного воздуха внутрь сопла.

4. Установлено, что высотное сопло, имеющее на сверхзвуковой части кольцевую щель и два пояса отверстий, в земных условиях практически работает как короткое сопло (как бы отключается участок сопла за щелью). Показано, что для ракетных двигателей, работающих в широком диапазоне изменения внешнего давления, целесообразно применение щелевого сопла с расчетной высотой $P_a = (0,005 - 0,01)$ МПа. Причем, щель следует располагать в сечении с давлением на стенке $P_{щ} = 0,06 - 0,07$ МПа, а ее ширину следует выбрать, равной $h/R_{кр} = 0,2 \dots 0,4$.

5. Проведены огневые испытания на натуральных компонентах: кислород + керосин модельного двигателя, снабженного щелевым соплом. Результаты огневых испытаний щелевого сопла (прирост тяги составил 8% от идеальной тяги или 14% от действительной тяги) хорошо совпадают с экспериментальными данными, полученными при сравнительном его испытании на дифференциальной установке, работающей на сжатом воздухе, и, таким образом, полностью подтверждена достоверность полученных ранее результатов испытаний.

Список литературы

1. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика.- М.: Наука, 1976.- 888 с.
 2. Васильев А.П., Кудрявцев В.М., Курпатенков В.Д. и другие. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей. – М.: Высшая школа, 1993. – том 1, 2, 725 с.
 3. Реактивное сопло ракетного двигателя с устройством для передачи атмосферного давления внутрь сопла. Патент № 3469787, США. – класс 239 – 127.3, заявлено 07.09.1966.-Опубл. 1969.
-

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

*Семенов Василий Васильевич, ведущий научный сотрудник кафедры теории ракетных двигателей
Московского государственного авиационного института(технического университета), к.т.н.,
с.н.с.*