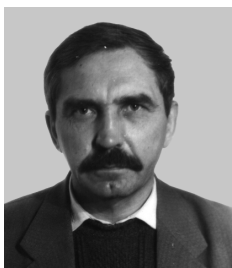


Василий Антонович Гостев родился в 1943 г., окончил в 1968 г. Харьковский авиационный институт. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Ракетные двигатели” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 40 научных работ в области ракетных двигателей.

V.A. Gostev (b. 1943) graduated from the Kharkov Aviation Institute in 1968. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Rocket Engines” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 40 publications in the field of rocket engines.



Владимир Иванович Черепов родился в 1942 г., окончил в 1969 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Начальник отдела ФГУП “Московский институт теплотехники” заслуженный изобретатель РФ. Автор более 300 научных работ в области ракетных двигателей.

V.I. Cherepov (b. 1942) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1969. Head of department of Federal State Unitary Enterprise “Moscow Institute for Heat Technology”. Author of more than 300 publications in the field of rocket engines.

---

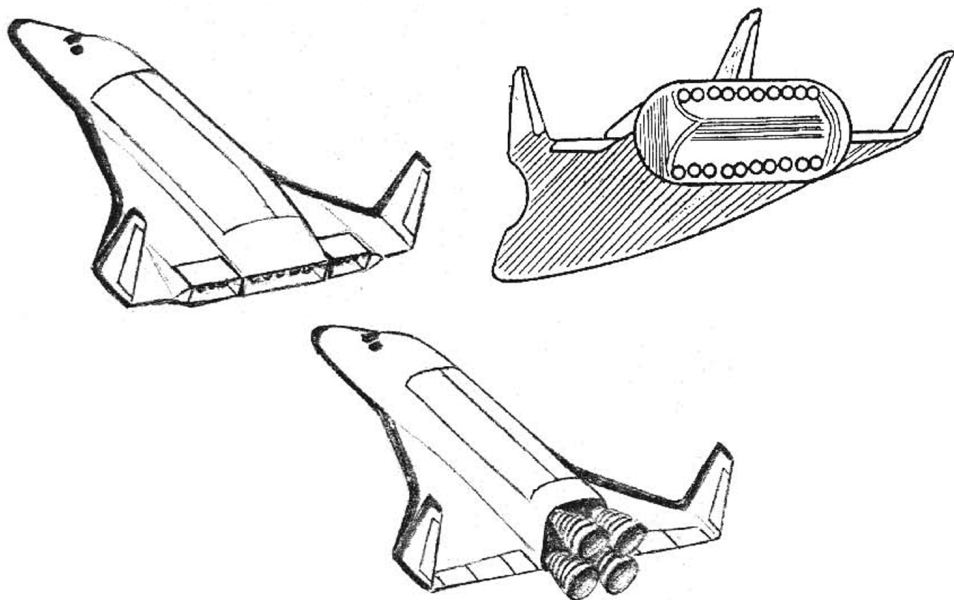
УДК 553.6.0:13.422

А. А. Т а л а л а е в

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОСКОГО СОПЛОВОГО БЛОКА РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ С АВТОРЕГУЛИРОВАНИЕМ ВЫСОТНОСТИ**

*Обобщены современные тенденции и взгляды на разработку перспективных двигательных установок летательных аппаратов. Предложена и экспериментально исследована конструкция соплового блока реактивного двигателя, в которой реализованы два подхода: модульный подход к компоновке двигательной установки и создание многорежимных авторегулируемых сопловых устройств. Объяснены физические явления, имеющие место в предлагаемой конструкции, и продемонстрированы реальные преимущества по сравнению с традиционным осесимметричным высотным соплом.*

Одним из эффективных способов создания двигательных установок больших тяг является модульный подход к компоновке. Требуемый уровень тяги и необходимые габаритные размеры двигательной установки обеспечиваются набором стандартных хорошо отработанных двигателей (модулей), образующих всевозможные виды их пространственных компоновок (круглые, линейные, кольцевые и пр.) (рис. 1). Проектирование, изготовление, отладку и доводку каждого модуля проводят автономно, что существенно снижает стоимость и повышает



**Рис. 1. Варианты компоновки двигательной установки**

надежность двигательной установки в целом. Помимо этого, отдельные модули двигательной установки могут содержать как камеры сгорания различного назначения (ЖРД, РДТТ), работающие на различных компонентах топлива, так и реактивные сопла различного назначения (земные и высотные) разных пространственных конфигураций (в том числе и некруглых форм).

По мере развития и совершенствования ракетно-космической техники растут требования, предъявляемые к эффективности двигательной установки. Эффективная двигательная установка отвечает многим требованиям, среди которых, прежде всего, наличие максимального удельного импульса при минимальных массе и габаритных размерах. Из большого числа факторов, от которых зависят удельный импульс, габаритные размеры и масса двигателя, основным является правильно подобранный сопловой блок, состоящий из ряда круглых сопел.

Как известно, при жестком нерегулируемом сопле с оптимальной высотой максимальный удельный импульс будет достигнут тогда, когда давление на срезе будет выбрано равным некоторому среднему по траектории атмосферному давлению.

Наибольший или предельный средний по траектории удельный импульс будет иметь двигатель, снабженный соплом с идеально регулируемой высотностью. Однако создание такого сопла сопряжено с большими конструктивными трудностями и пока не реализовано на практике.

Большие потери тяги в соплах интенсифицируют работы по модернизации существующих реактивных сопел с фиксированной степенью расширения.

Множество вариантов взаимного расположения модулей (круглых сопел), возможность совместного использования двигателей, работающих на различных компонентах топлива, дают основание сделать вывод о перспективности разработки таких сопловых блоков.

Для устранения перерасширения газа внутри сопла предложены различные варианты: например, сопло с удаляемой вставкой, сопло с изломом контура, сопло с выдвигаемым насадком, трехкомпонентный двигатель с двумя критическими сечениями и т.д. Однако все эти сопла имеют ряд недостатков.

Современные двигательные установки часто имеют многокамерную или многодвигательную схему. Преимущества модульной компоновки двигательной установки заключаются в использовании надежных и проверенных узлов и агрегатов двигателя; использовании имеющихся испытательных стендов; сокращении габаритных размеров двигательной установки.

Одним из направлений совершенствования двигательной установки большой тяги является разработка новых вариантов конструкций сопловых блоков, состоящих из круглых сопел, выходные сечения которых объединены общим высотным насадком. Характерной особенностью при создании таких сопловых блоков является возможность использования линейных связок обычных круглых сопел.

Например, фирмой Lockheed Martin (США) разработана двигательная установка для ЛА Х-33, состоящая из двух рядов по десять камер сгорания в каждом и общего центрального плоского насадка. Это беспилотное транспортное средство, запускаемое вертикально, подобно ракете, с возможностью достижения высоты в 50 миль и скоростей более 15 М, приземляется горизонтально, подобно самолету.

**Объект экспериментального исследования.** Кратко описание предлагаемой конструкции соплового блока может быть представлено так: сопловой блок ракетного двигателя состоит из двух или нескольких расположенных в ряд круглых сопел 1 и плоского высотного насадка 2, каждая тяговая стенка которого является продолжением контуров сверхзвуковых частей круглых сопел, а две боковые стенки насадка 3 параллельны и расположены перпендикулярно к тяговым стенкам насадка (рис. 2).

Во время работы двигательной установки на старте ракеты (вблизи Земли) повышенное атмосферное давление действует на поток в насадке, вызывая принудительный отрыв газа от его стенок, благодаря чему газ в насадке не перерасширяется. В этом случае скачки уплотнения располагаются на срезах круглых сопел и режим работы соплового блока близок к расчетному. С уменьшением атмосферного давления скачки уплотнения переходят на тяговую поверхность насадка за срез круглых сопел, который при этом начинает участвовать в создании тяги. И, наконец, на большой высоте (в верхних

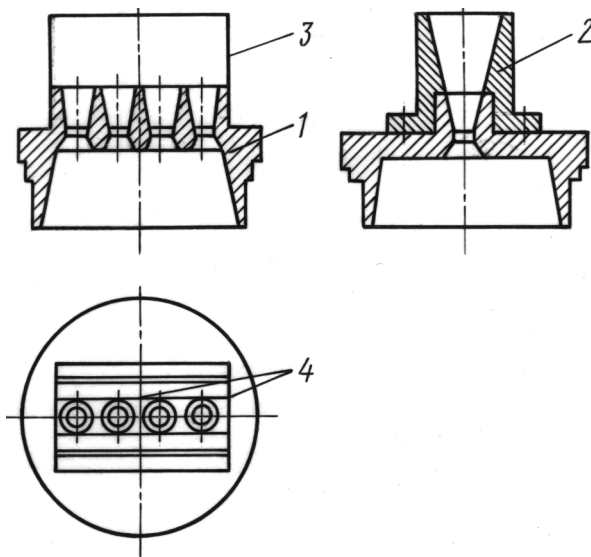


Рис. 2. Сопловой блок с плоским насадком

слоях атмосферы) скачки уплотнения выходят на срез насадка соплового блока и он полностью запускается. Таким образом, в плотных слоях атмосферы щелевое сопло обеспечивает значительный прирост тяги по сравнению с осесимметричным высотным соплом. Такой способ и есть газодинамическое авторегулирование высотности соплового блока.

В сопловом блоке использованы круглые конические сопла, а тяговые стенки высотного насадка — плоские.

При этом предполагалось, что основные результаты, полученные на конических соплах, будут справедливыми и для профилированных сопел. Эксперименты проводили на холодном воздухе, поэтому могла произойти конденсация воздуха при его перерасширении в сопле. Чтобы исключить влияние конденсации воздуха на тяговые характеристики двигателя, сопла и насадок были рассчитаны на сравнительно умеренное число Маха  $M_a = 3,75$ .

Каждое круглое сопло — это сопло двигателя первой ступени с расчетным давлением на срезе  $p_a = (0,6 \dots 0,7) \cdot 10^5$  МПа. и числом  $M_a = 2,6$ . Сопловой блок в целом является высотным с расчетным значением давления на срезе  $p_a = (0,1 \dots 0,2) \cdot 10^5$  МПа. В качестве эталонного сопла при сравнительных испытаниях использовано круглое коническое сопло с одинаковой (с сопловым блоком) геометрической степенью расширения, одинаковыми углами входного и выходного сечений ( $2\beta_a = 24^\circ$ ,  $2\beta_m = 60^\circ$ ).

На рис. 3 приведен общий вид серии моделей сопловых блоков с плоским насадком.

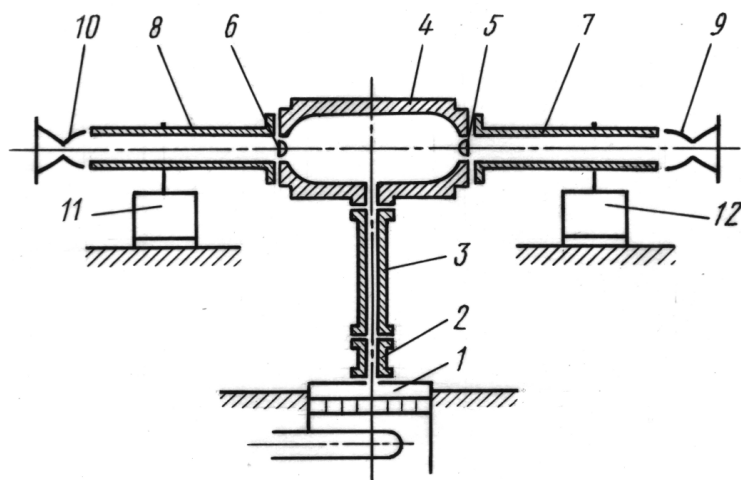
**Условия проведения экспериментов.** Сравнительные испытания сопловых блоков с осесимметричным соплом проводились на газо-



**Рис. 3. Общий вид сопловых блоков с плоским насадком**

динамической дифференциальной установке (ГДУ) путем продувок холодным воздухом ( $K = 1,4$ ). Принципиальная схема ГДУ приведена на рис. 4, она состоит из следующих основных элементов: 1 — нижний ресивер; 2 — тензометрический стакан; 3 — колонна (вертикальная труба); 4 — воздушный дифференциал; 5, 6 — блок делительных сопел; 7, 8 — рабочие цилиндры; 9, 10 — объекты исследования — сопла; 11, 12 — демпферы. Воздух высокого давления подводится к нижнему ресиверу 1. Затем, пройдя через полый тензостакан 2 и колонну 3, поступает в воздушный дифференциал 4. На входе в рабочие цилиндры 7, 8 установлены блоки делительных сопел 5, 6, которые обеспечивают подачу в рабочие цилиндры одинакового количества воздуха. С целью устранить колебания маятникового узла во время испытаний применяются масляные демпферы 11, 12. На рабочие цилиндры устанавливаются испытуемые сопла 9 и 10.

При подготовке установки к работе важным мероприятием является “доводка” (путем притирания) блоков делительных сопел 5 и 6, с целью обеспечения одинакового расхода воздуха ( $G_1$  и  $G_2$ ), поступающего к испытуемым соплам 9 и 10.



**Рис. 4. Схема газодинамической дифференциальной установки**

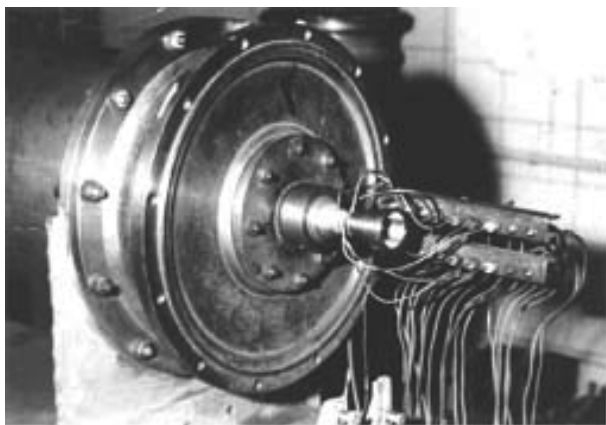
Особенность ГДУ заключается в том, что с ее помощью с высокой точностью измеряется малая разность больших величин тяг сравниваемых реактивных сопел ( $\Delta P$ ) при одинаковом расходе воздуха через них ( $G = \text{const}$ ). На основе результатов статистических испытаний при “доводке” экспериментальной установки определены величины относительных погрешностей при испытании сопел на различных режимах течения в соплах и по разным методикам. При испытаниях сопел на режимах перерасширения величина относительной погрешности составляет  $\bar{\sigma} = \pm 0,2\%$ , а на автотомодельном режиме  $\bar{\sigma} = \pm 0,1\%$  от тяги модельного сопла.

Испытания на автотомодельном режиме проводили, используя жестко закрепленные на срезах сопел воздушные диффузоры, которые в полной мере выполняли ту же функцию, что и барокамера. Основное назначение диффузора, как и барокамеры, изолировать струи газа, истекающего из сопла, от внешней среды на некотором протяжении. Эта длина должна быть достаточной, чтобы вместить всю систему последовательных скачков уплотнения, и должна составлять приблизительно 10 калибров. Проходя через систему скачков, поток постепенно замедляется и одновременно в нем повышается давление. Из диффузора истекает струя с дозвуковой скоростью с восстановленным до атмосферного значением давления. Перед проведением тяговых испытаний сопловых блоков для всех внутренних поверхностей диффузоров (круглого, квадратного и прямоугольного сечений) получены значения величин потерь тяги в них. Проведенные исследования, сопровождающиеся конкретными результатами, позволяют получать результаты сравнительных испытаний, непосредственно сравнивая высотные сопла с разными конфигурациями выходных частей, учитывая потерю тяги, вносимую каждым диффузором. Таким образом, предложенный способ имитации высотных условий работы сопел в земных условиях — жесткое закрепление к выходным сечениям сопел сверхзвуковых диффузоров, для обеспечения безотрывного течения — может быть использован вместо барокамеры на газодинамической дифференциальной установке.

**Дренажные испытания.** Модельный сопловый блок и круглое коническое сопло испытывали на газодинамической установке, схема которой приведена на рис. 5.

Для измерения распределения давления по длине сопла и стенок насадка выполнены отверстия диаметром 1 мм, к которым были припаяны медные трубки. Через эти трубки давление газа передавалось к преобразователям давления типа МП. Для уменьшения влияния отверстий на характер течения газа внутри круглого сопла они были расположены по эвольвенте.

В целях выяснения характера течения потока в плоском высотном насадке соплового блока были проведены дренажные испытания, а



**Рис. 5. Газодинамическая установка**

также дренирование тяговой стенки плоского насадка в пяти сечениях, равномерно распределенных по длине насадка. Первая и последняя точки замеров располагались соответственно напротив застойной зоны (естественного уступа, образованного между срезами круглых сопел и стенками насадка) и на минимальном расстоянии от среза выходного сечения плоского насадка. Также на определенных расстояниях от выходного среза проведено дренирование тяговой стенки круглого высотного сопла. Расстояния, на которых расположены дренажные отверстия, подобраны с учетом равенства площадей сечений плоского насадка и высотного сопла.

Давление воздуха измерялось с помощью преобразователей давления промышленного производства типа МП. Класс точности датчиков — 0,6, при этом предел допустимой основной погрешности составляет  $\pm 0,6\%$ .

Результаты дренажных испытаний представлены для трех режимов работы соплового блока —  $\bar{p}_a = p_a/p_n = 0,3; 0,4; 0,5$ .

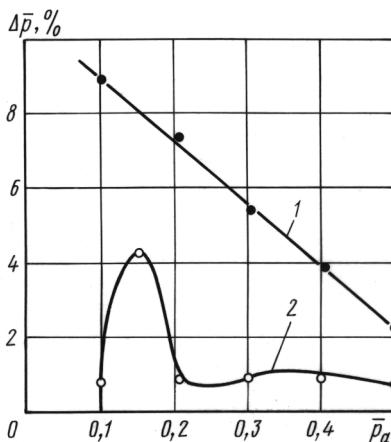
Для определения тяговых характеристик соплового блока проведены сравнительные испытания соплового блока с плоским высотным насадком и высотного круглого конического сопла с одинаковыми степенями расширения и углами раскрытия сверхзвуковых частей на ГДУ путем продувок холодным воздухом ( $k = 1,4$ ). Осевую силу, пропорциональную разности тяг сравниваемых сопел, измеряли с помощью тензодатчиков. Под воздействием разности тяг сопротивление тензорезисторов меняется, вследствие чего происходит разбаланс моста и на его диагонали появляется напряжение несущей частоты. Электрический сигнал усиливается и фильтруется, это позволяет выделить полезный сигнал. При испытаниях была использована тензометрическая станция типа 4АНЧ22.

Далее приведены результаты сравнительных испытаний соплового блока с количеством круглых сопел, расположенных в ряд ( $n = 4$ ),

без высотного насадка и оснащенного плоским высотным насадком, в диапазоне изменения давлений  $p_a = (0,1 \dots 0,5)$ , соответствующих режиму работы двигательной установки 1-й ступени.

На рис. 6 приведены результаты сравнительных испытаний соплового блока с высотным насадком и без него и круглого конического высотного сопла.

Из рис. 6 видно, что во всем исследуемом диапазоне отношений давлений сопловой блок с плоским насадком обеспечивает прирост тяги (кривая 2). Максимальный прирост тяги до  $\Delta P = 4,2\%$  в диапазоне отношений давлений  $\bar{p}_a = 0,1 \dots 0,2$  — факт известный и объясняется задержкой скачка уплотнения на естественных уступах, расположенных между срезами круглых сопел и стенками насадка. Прирост тяги в диапазоне  $\bar{p}_a = 0,3 \dots 0,5$  составил  $\sim 1\%$  и объясняется лучшим, чем в круглом высотном сопле, восстановлением давления в плоском насадке. Кривая 1 показывает прирост тяги соплового блока без высотного насадка. Из рис. 6 видно, что на данных режимах работы соплового блока ( $\bar{p}_a = p_a/p_n = 0,3; 0,4; 0,5$ ) скачки уплотнения располагаются на срезах круглых сопел (плоский насадок не создает тягу), отрыв потока в плоском сопле наступает раньше, чем в круглом высотном сопле, а восстановление давления в плоском насадке не хуже, чем в круглом сопле. Таким образом, дополнительный прирост тяги в диапазоне работы при степенях нерасчетности  $\bar{p}_a = 0,3 \dots 0,5$  объясняется тем, что потери тяги в круглом высотном сопле, связанные с перерасширением потока газа, несколько превышают потери тяги, создаваемые линейной связкой сопел, снабженных общим плоским высотным насадком.



**Рис. 6. Результаты дренажных испытаний:**

1 и 2 — распределение давления на стенке плоского насадка и высотного сопла

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Хиллей Р. Линейный двигатель // Ракетные двигатели. — 1977. — № 6.
- Георг Д. Усовершенствованные двигательные установки для КА // Астронавтика и ракетодинамика. — 1988. — № 11.
- Локхид Мартин “aerospike”, Транспортное средство X33 (Ракетоплан). AIAA-95- 2541, AIAA/SAE/ASME/ASEE 31th Joint Prop. Conference, CA. — July 10–12, 1995.

Статья поступила в редакцию 21.11.2005