

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ СОПЛА
ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ***Д. А. Ягодников, А. В. Воронцовский, Н. М. Пушкин**НИИ энергетического машиностроения,
107005 Москва*

Разработана методика электрофизической диагностики и проведены экспериментальные исследования процесса электризации сопла жидкостного ракетного двигателя, работающего на углеводородном топливе. Установлено, что наибольший электрический потенциал сопла реализуется при близком к стехиометрическому соотношению компонентов, когда скорость потока, температура и, следовательно, ионизация продуктов сгорания максимальны. Приводятся рекомендации по практическому использованию полученной информации.

В проведенных к настоящему времени экспериментально-теоретических исследованиях установлено, что при эксплуатации различных двигательных установок наблюдается электризация камер сгорания (КС) и сопловых блоков [1–4]. Так, в [2] показано, что элементы конструкции твердотопливной двигательной установки, обтекаемые высокотемпературным потоком продуктов сгорания (ПС), приобретают большой отрицательный потенциал $\varphi_c \approx 1$ кВ. Причем значение φ_c тем меньше, чем выше температура, а следовательно, и электрическая проводимость ПС, в результате чего заряд уносится потоком. В работе [3] в стендовых испытаниях модельного воздушно-реактивного двигателя с электрически изолированным соплом получены результаты, согласно которым наибольшее значение $\varphi_c = -400$ мВ реализуется при стехиометрическом соотношении компонентов топлива и существуют такие диапазоны коэффициента избытка окислителя α , где потенциал сопла меняет знак на положительный. Количественное отличие экспериментальных данных обусловлено, по нашему мнению, тем, что в работе [2] электрически изолировался весь двигатель, а в [3] изолировалось только сопло, и утечка заряда на заземленный корпус КС была значительнее.

Электризация элементов конструкции возникает вследствие того, что при истечении высокотемпературных, ионизованных продуктов сгорания на границе раздела ионизованный газ — стенка образуется двойной электрический слой определенным образом ориентированных ионов, вызывающий соответствующее перераспределение ионной структуры поверхностного слоя в материале стенки, в результате чего последняя электризуется [5]. Этот вид электризации получил название двигательной или внутренней. Заметим, что при движении летательных аппаратов в верхних слоях атмосферы возможна внешняя электризация за счет взаимодействия элементов конструкции КС с потоками заряженных частиц, генерируемых Солнцем или Галактикой [6].

Поскольку зарегистрирована взаимосвязь между параметрами рабочего процесса и электрическим потенциалом деталей КС и сопла, то представляется возможным создание систем электрофизической диагностики и регулирования двигательных установок. Кроме того, изучение закономерностей накопления электрических зарядов на элементах конструкции летательных аппаратов необходимо для предотвращения возникновения

аварийных ситуаций и исключения воздействия этих зарядов на работу бортовой аппаратуры (в особенности, объектов космической техники).

В связи с этим цель данной работы состояла в исследовании процесса электризации сопла модельного жидкостного ракетного двигателя (ЖРД). Эксперименты проводились по стандартным методикам на специализированном стенде, позволяющем осуществлять дозированную подачу в камеру сгорания топливных компонентов, в качестве которых используются газообразный кислород и 80 %-й (по объему) водный раствор этилового спирта. Основным варьируемым параметром принято соотношение между массовыми расходами горючего и окислителя, характеризующее коэффициент избытка окислителя.

Для определения закономерностей и характеристик процесса электризации изготовлен специальный сопловой насадок, электрически изолированный от камеры сгорания с помощью прокладки толщиной 10 мм из стеклотекстолита П5-7 (рис. 1). Этот насадок сконструирован таким образом, чтобы обеспечить безотрывное течение потока в месте сопряжения со срезом сопла ЖРД и расширение потока продуктов сгорания до значения $D_a/D_{кр} = 1,8$. Здесь $D_a = 18$, $D_{кр} = 10$ мм — диаметры среза соплового насадка и критического сечения соответственно. Поскольку насадок выполнен неохлаждаемым (стенка толщиной $6 \div 8$ мм из жаропрочной стали 1Х18Н10Т) и в процессе эксперимента нагревается, то для измерения температуры в стенку насадка вмонтирована термопара хромель — копель (спай расположен на глубине, равной половине толщины стенки). Сигналы с термопары и потенциал сопла, измеряемый между насадком и заземленной КС, через универсальный усилитель Топаз-3 поступали на избиратель предела Р009 и регистрировались шлейфовым осциллографом Н-117. Систематическая погрешность регистрации параметров не превышала 4,5 %.

В работе [1] получена теоретическая зависимость, связывающая параметр φ_c с газодинамическими и электрофизическими характеристиками потока продуктов сгорания

$$\varphi_c \sim D_a q_e n_e w_a \sigma.$$

Здесь q_e — заряд электрона, n_e — равновесное значение концентрации электронов на границе двойного электрического слоя, w_a — скорость потока на срезе сопла, σ — электрическая проводимость слоя. Причем параметры w_a , n_e , σ взаимосвязаны и, например, увеличение геометрической степени расширения сопла $D_a/D_{кр}$ приводит к возрастанию скорости истечения, но одновременно и обуславливает уменьшение n_e и σ , поскольку поток ПС, расширяясь, охлаждается.

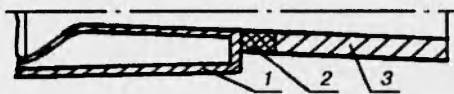


Рис. 1. Экспериментальная модель:
1 — охлаждаемое сопло, 2 — изолятор, 3 — сопловой насадок.

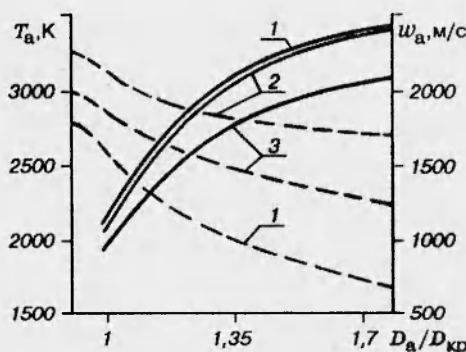


Рис. 2. Изменение параметров по соплу ЖРД.

α : 1 — 0,46, 2 — 0,9, 3 — 2,31. Сплошные линии — w_a , штриховые — T_a .

Таблица 1

α	$w_a, \text{ м/с}$	$T_a, \text{ К}$	Концентрация отрицательных ионов, моль/кг						n_e
			O^-	O_2^-	OH^-	H^-	HO_2^-	C^-	
0,46	2429	1700	$1,1 \cdot 10^{-17}$	$2,9 \cdot 10^{-20}$	$5 \cdot 10^{-14}$	$1,3 \cdot 10^{-15}$	$3,6 \cdot 10^{-20}$	0	$7,5 \cdot 10^{-12}$
0,9	2400	2680	$4,2 \cdot 10^{-10}$	$6,3 \cdot 10^{-11}$	$4,4 \cdot 10^{-9}$	$4,1 \cdot 10^{-11}$	$2,6 \cdot 10^{-12}$	$1,7 \cdot 10^{-20}$	$4,5 \cdot 10^{-8}$
2,31	2062	2170	$1,4 \cdot 10^{-11}$	$2,5 \cdot 10^{-14}$	$1,4 \cdot 10^{-10}$	$3,9 \cdot 10^{-14}$	$4,2 \cdot 10^{-13}$	0	$5,8 \cdot 10^{-9}$

Таблица 2

α	Концентрация положительных ионов, моль/кг									
	O^+	O_2^+	H^+	H_3^+	OH^+	H_2O^+	H_3O^+	CHO^+	CO^+	CO_2^+
0,46	$9,1 \cdot 10^{-20}$	0	0	$6,2 \cdot 10^{-18}$	0	$1,6 \cdot 10^{-18}$	$7,5 \cdot 10^{-12}$	$1,5 \cdot 10^{-14}$	0	0
0,9	$2,7 \cdot 10^{-15}$	$1,3 \cdot 10^{-10}$	$8,6 \cdot 10^{-14}$	$1,8 \cdot 10^{-12}$	$7,4 \cdot 10^{-13}$	$8,9 \cdot 10^{-11}$	$5,4 \cdot 10^{-8}$	$3,5 \cdot 10^{-10}$	$4,9 \cdot 10^{-14}$	$7,4 \cdot 10^{-13}$
2,31	$8,4 \cdot 10^{-18}$	$2,9 \cdot 10^{-11}$	$1,3 \cdot 10^{-17}$	$1,7 \cdot 10^{-17}$	$2,8 \cdot 10^{-15}$	$5 \cdot 10^{-13}$	$7,6 \cdot 10^{-10}$	$1,3 \cdot 10^{-13}$	$5,9 \cdot 10^{-18}$	$2,8 \cdot 10^{-15}$

Поэтому с целью изучения взаимосвязи режимов работы ЖРД и геометрии сопла с факторами, определяющими процесс электризации, по методике [7] выполнены термодинамические расчеты характеристик истечения применительно к условиям, реализуемым в экспериментальных исследованиях. На рис. 2 представлено изменение температуры T_a и скорости потока ПС вдоль соплового тракта при различных α . Полученные данные свидетельствуют, что использование дополнительного соплового насадка привело к снижению температуры ПС на 6–15 % и возрастанию скорости потока на 16–18 %. Однако, несмотря на большее расширение ПС, во всех случаях значения температур достаточно высоки, и в продуктах сгорания содержатся положительные и отрицательные ионы и свободные электроны, мольная концентрация которых зависит от температуры продуктов сгорания и принимает максимальное значение при стехиометрическом соотношении компонентов (табл. 1 и 2). Следовательно, в этом случае будет и наибольшая электризация теплового насадка.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили это предположение. На рис. 3 изображено изменение во времени значений φ_c и температуры насадка T_c на трех режимах работы ЖРД (давление в камере сгорания во всех случаях поддерживается постоянным $p_k = 1$ МПа). Установлено, что в момент запуска ЖРД сопло приобретает положительный потенциал 40–100 мВ, что может быть объяснено влиянием на ионный состав ПС (а следовательно, и двойного электрического слоя) электрических зарядов, генерируемых системой воспламенения (которая автоматически отключается через 4 с). Спустя 2,5–3 с величина φ_c изменяет знак и после выхода ЖРД на режим практически не изменяется. Заметим, что длительность переходного процесса достаточно велика вследствие заброса давления в КС и неполноты сгорания топлива в начальный период работы установки.

Из осциллограммы видно также, что значение T_c постепенно увеличивается и тем интенсивнее, чем выше температура продуктов сгорания. Причем за счет очевидной нестационарности процессов теплообмена после останова ЖРД температура соплового насадка в месте замера продолжает расти до значений 500, 800 и 600 К (соответственно линии 1–3 на рис. 2). Тем не менее уровень температур меньше значений, при которых возможна термическая эмиссия электронов с поверхности сопла. Поэтому в этих экспериментах влиянием нагрева сопла на электризацию можно пренебречь.

Из приведенных данных следует, что существует корреляция между потенциалом сопла на стационарном режиме и коэффициентом избытка окислителя. Причем зависимости $T_a(\alpha)$ и $\varphi_c(\alpha)$ аналогичны и сопло приобретает наибольший отрицательный потенциал $\varphi_c = 180$ мВ при соотношении компонентов, близком к стехиометрическому (рис. 4).

Представляют определенный интерес результаты, зарегистрированные при продувке КС воздухом после останова ЖРД. В случае, когда

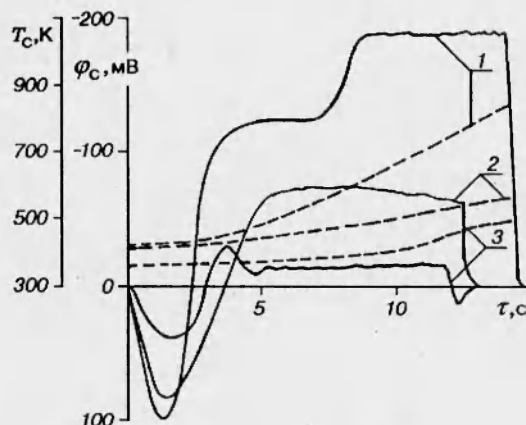


Рис. 3. Осциллограмма пуска.

α : 1 — 2,31, 2 — 0,9, 3 — 0,46. Сплошные линии — φ_c , штриховые — T_c .

время пуска $\tau_{\text{п}}$ не превышает 15 с и уровень теплового воздействия на стенку насадка незначителен ($T_c < 800 \div 900$ К), потенциал сопла равен нулю. Однако при $\tau_{\text{п}} = 30 \div 35$ с температура сопла увеличивается до 1200–1300 К и наблюдается его видимое свечение. Тогда в случае продувки сопло приобретает отрицательный потенциал, составляющий $\sim 50\%$ от значения φ_c на основном режиме работы ЖРД. Объясняется это тем, что, когда воздух обтекает нагретые до высокой температуры внутренние стенки неохлаждаемого соплового насадка, происходит термическая ионизация воздуха и, следовательно, разделение зарядов в двойном электрическом слое.

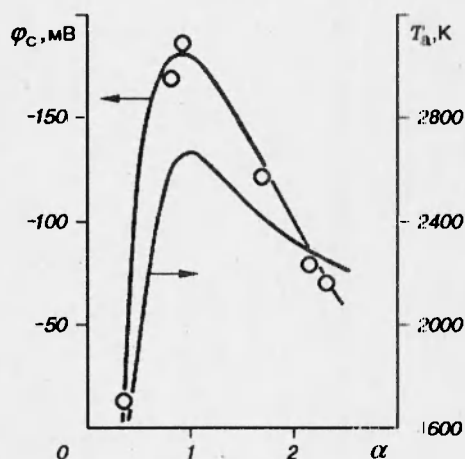


Рис. 4. Зависимость φ_c и T_c от α .

В заключение отметим, что полученная информация о закономерностях электризации сопла ЖРД может использоваться при разработке систем электрофизической диагностики рабочего процесса, например, для контроля α , температуры и полноты сгорания топлива. Кроме того, для мощных ЖРД, например, стартовых, маршевых или высотных, когда наряду с большими габаритами реализуются высокие значения скоростей истечения и температур ПС, можно ожидать значительную интенсификацию процессов электризации, что необходимо учитывать в процессе проектирования и эксплуатации летательных аппаратов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Потапов Г. П., Дрегаллин А. Ф. Образование статического электричества при истечении из сопла ионизированного газа // Изв. вузов. Авиац. техника. 1977. № 5. С. 90–92.
2. Потапов Г. П. Электризация реактивных сопел // Изв. вузов. Авиац. техника. 1978. № 4. С. 112–116.
3. Черепнин С. Н., Дашевский В. Н. Влияние внешнего электрического поля на параметры горения и электризацию сопла энергетической установки // Физика горения и взрыва. 1990. Т. 26, № 6. С. 74–78.
4. Гречихин Л. И., Пушкин Н. М. Влияние сажевых частиц на термодинамическое состояние нагретых газов при различных температурах // Изв. вузов. Авиац. техника. 1983. № 1. С. 84–87.
5. Лоеб Л. Статическая электризация. М.: Госэнергоиздат, 1963.
6. Акишин А. И., Новиков Л. С. Электризация космических аппаратов. М.: Знание, 1985.
7. Применение ЭВМ для термодинамических расчетов металлургических процессов / Г. Б. Синярев, Н. А. Ватолин, Б. Г. Трусов и др. М.: Наука, 1982.

Поступила в редакцию 26/1 1994 г.