

## ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПРЕДЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРИЗАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ПРОТОЧНОГО ТРАКТА РДТТ

К.В. Федотова  
Д.А. Ягодников

fedotova@bmstu.ru  
daj@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

Выполнено параметрическое исследование влияния состава модельной энергетической конденсированной системы, температуры продуктов сгорания и давления в камере сгорания (4...10 МПа) на плавающий потенциал на внутренней идеальной стенке тракта РДТТ и изменение потенциала в двойном электрическом слое. Рассмотрены безметалловая модельная энергетическая конденсированная система, а также системы на основе перхлората аммония и инертного горючего-связующего вещества с добавлением порошкообразных алюминия и бора. Использована математическая модель плавающего потенциала на поверхности заряженной стенки в предположении распределения электронов в пристеночной области и бесстолкновительной плазмы по Максвеллу. Установлена слабая зависимость давления в камере сгорания от плавающего потенциала на стенке, однако вследствие уменьшения статического давления по тракту РДТТ модуль плавающего потенциала уменьшается. Выявлено, что абсолютное значение плавающего потенциала на идеальной внутренней стенке тракта РДТТ увеличивается с повышением температуры продуктов сгорания системы, оказывающей наибольшее влияние по сравнению с другими рассматриваемыми параметрами. Использование более энергоемкой энергетической конденсированной системы приводит к увеличению протяженности двойного электрического слоя, в котором нарушается квазинейтральность слабоионизованных продуктов сгорания за счет возрастания их температуры

### Ключевые слова

Слабоионизованная плазма, электризация, энергетическая конденсированная система, плавающий потенциал, двойной электрический слой

Поступила 31.07.2023  
Принята 13.11.2023  
© Автор(ы), 2024

---

*Работа выполнена при поддержке госпрограммы фундаментальных исследований Минобрнауки России (№ 0705-2020-0044)*

**Введение.** Проточный тракт РДТТ представляет собой осесимметричный объем, ограниченный подвижной поверхностью заряда энергетической конденсированной системы (ЭКС), а также стенками камеры сгорания (КС) и сопла. При работе РДТТ с поверхности горящего заряда в газовый тракт поступает высокотемпературный многофазный поток слабоионизованных продуктов сгорания (ПС). Стенки КС и сопла РДТТ защищены от воздействия ПС теплозащитным покрытием из композитных, полимерных, керамических и волокнистых материалов. Для защиты наиболее теплонагруженного критического сечения сопла могут применяться тугоплавкие металлы [1].

Оценка электрофизических параметров потока слабоионизованной плазмы, истекающего из сопла энергетической силовой установки различного типа (жидкостного ракетного двигателя или РДТТ, компрессорного или бескомпрессорного воздушно-реактивного двигателя), актуальна для оптимизации физико-химических процессов в КС, контроля аварийных ситуаций, управления параметрами потока. Значительное число работ посвящено исследованию электрофизических процессов в струе и КС модельных жидкостных ракетных двигательных установок [2–6].

При изучении электризации в ракетных двигателях основное внимание уделяется контактному и индукционному взаимодействиям частиц конденсированной фазы с поверхностью проточного тракта двигателя [6]. Кроме того, в некоторых работах электризацию объясняют свойствами двойного электрического пристеночного слоя при обтекании поверхности гомогенным потоком [7, 8].

Расчетными и экспериментальными методами в [8–14] исследован процесс электризации внутреннего тракта РДТТ электронами, а также вследствие термоэлектронной эмиссии от нагретых стенок КС и сопла, трибоэлектрической зарядки частицами конденсированной фазы в ПС, фотоэлектрической эмиссии и т. п.

Квазинейтральность слабоионизованного газа нарушается в области, называемой двойным электрическим слоем (ДЭС) и непосредственно примыкающей к твердой поверхности, т. е. у стенки [15]. Наиболее существенными параметрами являются плавающий потенциал и протяженность области в ДЭС, где потенциал отличен от нуля. Детальная структура ДЭС зависит от большого числа факторов и может изменяться в широких пределах.

Состояние заряженных частиц после столкновения с поверхностью стенки является важным фактором в случае наличия ДЭС. Если поверхность неэмиттирующая (например, если она охлаждается), то заряжен-

ные частицы, ударяясь о нее, либо остаются на поверхности, либо превращаются в нейтральные и возвращаются в газ.

Электрический потенциал на стенках проточного тракта РДТТ, образующийся вследствие электризации (уноса потоком ПС двигателя униполярно заряженных частиц), может достигать существенных значений, что приведет к коронированию корпуса, созданию помех, аномальному выбросу пламени за соплом и прочим негативным эффектам.

Несмотря на исследования, проводимые в области электризации в двигателях, данное явление ввиду сложности протекающих процессов все еще остается малоизученным. В общей постановке при их изучении необходимо учитывать взаимодействие слабоионизованной плазмы с поверхностью твердого тела с учетом многокомпонентности самого заряженного потока (наличие электронов, ионов, атомов и др.), а также огромного многообразия форм взаимодействия компонентов друг с другом и со стенкой. В пристеночной области возникает сложный пограничный слой, состоящий из структур как электронно-атомных, так и электронно-гидродинамических масштабов, а также из динамических структур различного рода с высокой концентрацией энергии и относительной автономностью. Важно, используя допущение об отсутствии взаимовлияния различных факторов, разделить эту комплексную задачу на несвязанные между собой направления исследования, отдельное рассмотрение которых позволяет достичь более существенного прогресса в накоплении знаний по изучаемым вопросам. В этом смысле перспективным представляется отдельное рассмотрение зависимости плавающего потенциала и толщины двойного электрического слоя от состава ЭКС.

*Цель настоящей работы* — расчетное параметрическое исследование влияния состава модельной ЭКС, выполненной на основе перхлората аммония (ПХА) с добавлением и без добавок металлов при давлении (4...10 МПа) в КС РДТТ на значение плавающего потенциала стенки, толщину ДЭС и характер изменения потенциала в ДЭС.

**Математическая модель.** Ранее в предположении распределения электронов в пристеночной области по Максвеллу, а также бесстолкновительной плазмы (толщина ДЭС меньше длины свободного пробега электронов) разработана математическая модель для расчета плавающего потенциала на поверхности заряженной стенки [16]. При разработке математической модели не учитываются смена полярности тока уноса, значение электрокинетического потенциала и амбиполярная диффузия, предполагается, что диссипация зарядов отсутствует.

В случае равенства температуры электронов и нейтрального газа, а также с учетом принятых допущений плавающий потенциал определяется по формуле

$$\varphi_0 = \frac{kT}{e} \left[ 0,226 + \frac{1}{2} \ln \frac{m_i}{m_e} \right], \quad (1)$$

где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К — постоянная Больцмана;  $T$  — температура потока электронов;  $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл — заряд электрона;  $m_i$  — молекулярная масса положительного или отрицательного иона;  $m_e = 5 \cdot 10^{-4}$  г/моль — молекулярная масса электрона.

Пространственное распределение потенциала  $\varphi(y)$  у стенки определяют по уравнению Пуассона — Больцмана

$$\Delta\varphi = \frac{\rho}{\varepsilon_0} = \frac{e}{\varepsilon_0} (n_e - n_i), \quad (2)$$

где  $\rho$  — плотность тока;  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м — электрическая постоянная;  $n_e, n_i$  — концентрация электронов и ионов.

Можно полагать, что электроны в ДЭС находятся в состоянии термодинамического равновесия. Тогда в соответствии с выводами статистической механики электроны подчиняются распределению Больцмана

$$n_e(y) = n \exp \left[ \frac{e\varphi(y)}{kT} \right], \quad (3)$$

где  $n_e(y)$  — концентрация электронов вдоль координаты  $y$ ;  $n$  — общая концентрация заряженных частиц.

При допущении, что ионы находятся в состоянии термодинамического равновесия, они также подчиняются распределению Больцмана

$$n_i(y) = n \exp \left[ -\frac{e\varphi(y)}{kT} \right]. \quad (4)$$

Подставив (3) и (4) в (2), получим уравнение

$$\frac{d^2\varphi}{dy^2} = -\frac{n}{\varepsilon_0} \left( \exp \left[ -\frac{e\varphi(y)}{kT} \right] - \exp \left[ \frac{e\varphi(y)}{kT} \right] \right), \quad (5)$$

решение которого при всех значениях  $y$  в пределах ДЭС удовлетворительно аппроксимируется выражением [15]

$$\varphi(y) = \varphi_0 \exp \left[ -\frac{y\sqrt{2}}{r_D} \right], \quad (6)$$

где  $r_D = \sqrt{(kT)/(4\pi ne^2)}$  — радиус Дебая.

**Результаты параметрического исследования.** Для проведения параметрического исследования влияния типа топлива на плавающий потенциал стенки и изменение потенциала в ДЭС используются модельные ЭКС следующих составов:

– ПХА 72 %, синтетический уретановый каучук 12 %, порошкообразный алюминий 16 % — ЭКС1.

– ПХА 20,2 %, полиуретан 38,2 %, порошкообразный бор 41,6 % — ЭКС2.

– ПХА 80 %, полисульфид 20 % — ЭКС3.

Приведенные варианты топлив выбраны из представлений о типовом составе металлизированных ЭКС на основе алюминия (ЭКС1) и бора (ЭКС2), а также не содержащих энергетические добавки металлов (ЭКС3) [17].

Примеры результатов термодинамического расчета в программе TERRA [18] в КС и на срезе сопла для заданных модельных ЭКС при давлениях 4 и 0,1 МПа приведены в табл. 1–3. В таблицах  $m_i$  — массовые доли заряженных частиц от общего числа ПС, включая неионизованные газовые компоненты в КС, критическом сечении и на срезе сопла при температурах  $T_k$ ,  $T_{кр}$  и  $T_a$  соответственно.

Таблица 1

**Результаты термодинамического расчета ЭКС1**

Заряженная частица	$m_i$ , г/моль	Массовая доля частиц в ПС при температуре		
		$T_k = 3572$ К	$T_{кр} = 3409$ К	$T_a = 2565$ К
$e^-$	$5 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-12}$	$6,9 \cdot 10^{-13}$	$4,2 \cdot 10^{-15}$
$O^+$	15,9	$1,8 \cdot 10^{-14}$	$4,7 \cdot 10^{-15}$	$1,5 \cdot 10^{-19}$
$O^-$	15,9	$1,7 \cdot 10^{-9}$	$6,0 \cdot 10^{-10}$	$1,3 \cdot 10^{-13}$
$O_2^+$	31,9	$9,5 \cdot 10^{-12}$	$3,3 \cdot 10^{-12}$	$7,8 \cdot 10^{-16}$
$O_2^-$	31,9	$3,5 \cdot 10^{-10}$	$1,1 \cdot 10^{-10}$	$9,3 \cdot 10^{-15}$
$H^+$	1,0	$6,9 \cdot 10^{-15}$	$2,1 \cdot 10^{-15}$	$2,8 \cdot 10^{-19}$
$H^-$	1,0	$4,2 \cdot 10^{-11}$	$1,5 \cdot 10^{-11}$	$6,2 \cdot 10^{-15}$
$H_3^+$	3,0	$3,5 \cdot 10^{-13}$	$1,2 \cdot 10^{-13}$	$1,2 \cdot 10^{-16}$
$OH^+$	17,0	$2,4 \cdot 10^{-12}$	$7,6 \cdot 10^{-13}$	$1,4 \cdot 10^{-16}$
$OH^-$	17,0	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$4,9 \cdot 10^{-9}$	$4,2 \cdot 10^{-12}$
$HO_2^-$	33,0	$3,5 \cdot 10^{-11}$	$1,0 \cdot 10^{-11}$	$7,6 \cdot 10^{-16}$
$H_2O^+$	18,0	$1,1 \cdot 10^{-10}$	$4,4 \cdot 10^{-11}$	$6,2 \cdot 10^{-14}$
$H_3O^+$	19,0	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$6,9 \cdot 10^{-9}$	$1,7 \cdot 10^{-10}$

Окончание табл. 1

Заряженная частица	$m_i$ , г/моль	Массовая доля частиц в ПС при температуре		
		$T_k = 3572$ К	$T_k = 3409$ К	$T_k = 2565$ К
$Cl^-$	35,4	$4,8 \cdot 10^{-6}$	$2,8 \cdot 10^{-6}$	$3,9 \cdot 10^{-8}$
$NO^+$	30,0	$1,4 \cdot 10^{-8}$	$7,2 \cdot 10^{-9}$	$4,5 \cdot 10^{-11}$
$NO_2^+$	46,0	$4,1 \cdot 10^{-13}$	$1,5 \cdot 10^{-13}$	$5,9 \cdot 10^{-17}$
$NO_2^-$	46,0	$2,9 \cdot 10^{-11}$	$8,9 \cdot 10^{-12}$	$9,5 \cdot 10^{-16}$
$NH_4^+$	18,0	$2,9 \cdot 10^{-12}$	$1,2 \cdot 10^{-12}$	$1,2 \cdot 10^{-14}$
$CO^+$	28,0	$6,9 \cdot 10^{-13}$	$2,2 \cdot 10^{-13}$	$5,2 \cdot 10^{-17}$
$CO_2^+$	44,0	$2,9 \cdot 10^{-12}$	$1,0 \cdot 10^{-12}$	$4,6 \cdot 10^{-16}$
$CHO^+$	29,0	$6,7 \cdot 10^{-10}$	$3,0 \cdot 10^{-10}$	$1,9 \cdot 10^{-12}$
$CN^-$	26,0	$1,4 \cdot 10^{-11}$	$3,9 \cdot 10^{-12}$	$7,6 \cdot 10^{-16}$
$Al^+$	26,9	$3,7 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$2,9 \cdot 10^{-8}$
$AlO^-$	42,9	$6,5 \cdot 10^{-8}$	$2,3 \cdot 10^{-8}$	$5,7 \cdot 10^{-12}$
$AlO_2^-$	58,9	$7,3 \cdot 10^{-9}$	$2,6 \cdot 10^{-9}$	$4,5 \cdot 10^{-13}$

Таблица 2

## Результаты термодинамического расчета ЭКС2

Заряженная частица	$m_i$ , г/моль	Массовая доля частиц в ПС при температуре		
		$T_k = 1992$ К	$T_{кр} = 1928$ К	$T_a = 1604$ К
$H_3O^+$	19,0	$9,9 \cdot 10^{-14}$	$4,2 \cdot 10^{-14}$	$1,9 \cdot 10^{-16}$
$Cl^-$	35,5	$1,3 \cdot 10^{-12}$	$5,9 \cdot 10^{-13}$	$3,3 \cdot 10^{-15}$
$NH_4^+$	18,0	$6,9 \cdot 10^{-13}$	$2,9 \cdot 10^{-13}$	$1,3 \cdot 10^{-15}$
$CHO^+$	29,0	$1,9 \cdot 10^{-13}$	$8,4 \cdot 10^{-14}$	$4,6 \cdot 10^{-16}$
$VO^-$	26,8	$2,8 \cdot 10^{-13}$	$9,9 \cdot 10^{-14}$	$1,1 \cdot 10^{-16}$
$VO_2^-$	42,8	$1,1 \cdot 10^{-13}$	$3,7 \cdot 10^{-14}$	$4,2 \cdot 10^{-17}$

Таблица 3

## Результаты термодинамического расчета ЭКС3

Заряженная частица	$m_i$ , г/моль	Массовая доля частиц в ПС при температуре		
		$T_k = 2313$ К	$T_{кр} = 2127$ К	$T_a = 1329$ К
$e^-$	$5 \cdot 10^{-4}$	$3,3 \cdot 10^{-18}$	$3,8 \cdot 10^{-19}$	$2,8 \cdot 10^{-26}$
$OH^-$	17,0	$2,3 \cdot 10^{-14}$	$1,6 \cdot 10^{-15}$	$3,4 \cdot 10^{-24}$
$H_3O^+$	19,0	$4,0 \cdot 10^{-10}$	$8,2 \cdot 10^{-11}$	$5,7 \cdot 10^{-16}$
$Cl^-$	35,5	$7,5 \cdot 10^{-10}$	$1,5 \cdot 10^{-10}$	$1,1 \cdot 10^{-15}$
$S^+$	32,1	$1,1 \cdot 10^{-13}$	$8,0 \cdot 10^{-15}$	$6,2 \cdot 10^{-24}$

Заряженная частица	$m_i$ , г/моль	Массовая доля частиц в ПС при температуре		
		$T_k = 2313$ К	$T_k = 2127$ К	$T_k = 1329$ К
$S^-$	32,1	$3,2 \cdot 10^{-13}$	$3,6 \cdot 10^{-14}$	$1,4 \cdot 10^{-21}$
$S_2^-$	64,1	$5,8 \cdot 10^{-12}$	$1,2 \cdot 10^{-12}$	$5,3 \cdot 10^{-18}$
$S_3^-$	98,2	$3,1 \cdot 10^{-13}$	$8,1 \cdot 10^{-14}$	$1,7 \cdot 10^{-18}$
$SO^-$	48,1	$2,5 \cdot 10^{-13}$	$2,3 \cdot 10^{-14}$	$2,6 \cdot 10^{-22}$
$SO_2^-$	64,1	$5,4 \cdot 10^{-12}$	$6,7 \cdot 10^{-13}$	$1,5 \cdot 10^{-19}$
$SH^-$	33,1	$4,4 \cdot 10^{-12}$	$7,5 \cdot 10^{-13}$	$9,9 \cdot 10^{-19}$
$NO^+$	30,0	$9,7 \cdot 10^{-13}$	$6,2 \cdot 10^{-14}$	$5,7 \cdot 10^{-23}$
$NH_4^+$	18,0	$9,6 \cdot 10^{-13}$	$2,4 \cdot 10^{-13}$	$1,6 \cdot 10^{-17}$
$CHO^+$	29,0	$1,1 \cdot 10^{-12}$	$1,2 \cdot 10^{-13}$	$5,0 \cdot 10^{-21}$

На основании результатов термодинамических расчетов модельных составов при давлениях в КС  $p_{к1} = 4$  МПа,  $p_{к2} = 6$  МПа,  $p_{к3} = 8$  МПа,  $p_{к4} = 10$  МПа по формуле (1) определены значения плавающего потенциала каждой заряженной компоненты ПС. Далее получены средневзвешенные значения плавающего потенциала на идеальной бесконечной стенке, находящейся в условиях, которые соответствуют трем характерным зонам двигательной установки (КС, критическому и выходному сечениям сопла). Результаты расчета приведены в табл. 4.

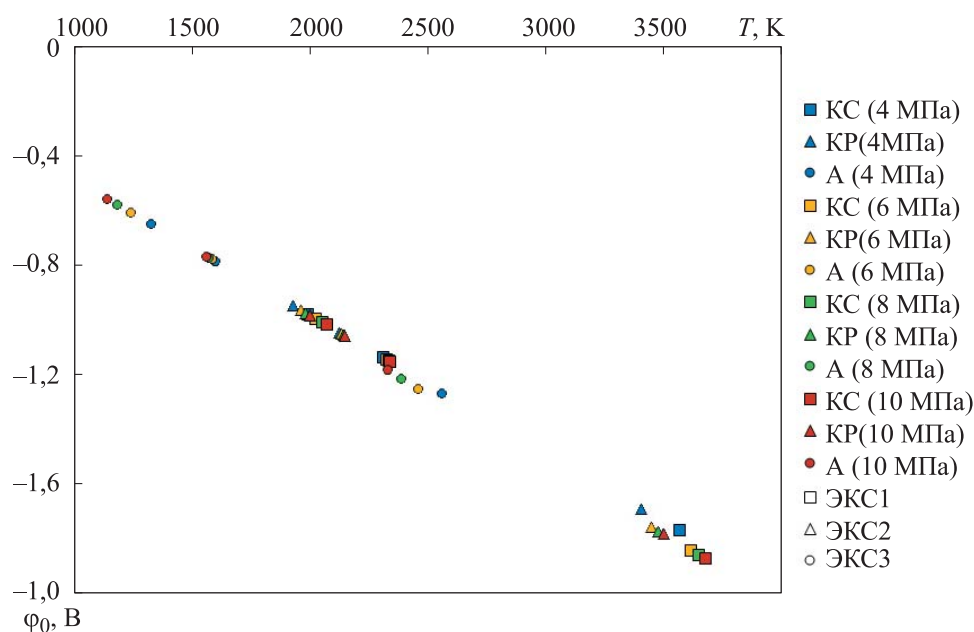
Таблица 4

**Средневзвешенные значения плавающего потенциала на идеальной стенке**

$p_k$ , МПа	ЭКС1		ЭКС2		ЭКС3	
	$T$ , К	$\varphi_0$ , В	$T$ , К	$\varphi_0$ , В	$T$ , К	$\varphi_0$ , В
4	3572	-1,77	1993	-0,98	2313	-1,14
	3409	-1,69	1929	-0,95	2127	-1,05
	2565	-1,27	1604	-0,79	1329	-0,65
6	3622	-1,84	2028	-0,99	2326	-1,14
	3453	-1,76	1962	-0,96	2137	-1,05
	2469	-1,26	1589	-0,78	1246	-0,61
8	3657	-1,86	2053	-1,01	2335	-1,15
	3483	-1,77	1985	-0,97	2145	-1,05
	2395	-1,22	1578	-0,78	1187	-0,58
10	3684	-1,87	2072	-1,02	2342	-1,15
	3506	-1,78	2003	-0,98	2151	-1,06
	2335	-1,19	1568	-0,77	1142	-0,56

Согласно данным из табл. 4, для ЭКС1 достигаются сравнительно большие по модулю значения  $\varphi_0$ , что связано с высокой температурой ПС, следовательно, большим содержанием ионов и электронов. Полученные результаты демонстрируют слабую зависимость плавающего потенциала стенки от состава ЭКС2 и ЭКС3, поскольку ПС рассматриваемых модельных топлив содержат одинаковое число заряженных частиц в общей массе соответствующих ПС. В случае ЭКС1 ПС содержат сравнительно большее число заряженных ионов и электронов, что приводит к увеличению модуля плавающего потенциала.

Средневзвешенные значения плавающего потенциала на идеальной стенке при различных значениях температуры, соответствующих характерным зонам РДТТ (КС, критическому и выходному сечениям сопла), и давления, которые согласуются с полученными значениями [16], приведены на рис. 1. Значения плавающего потенциала на стенке сопла жидкостного ракетного двигателя рассмотрены в [19].

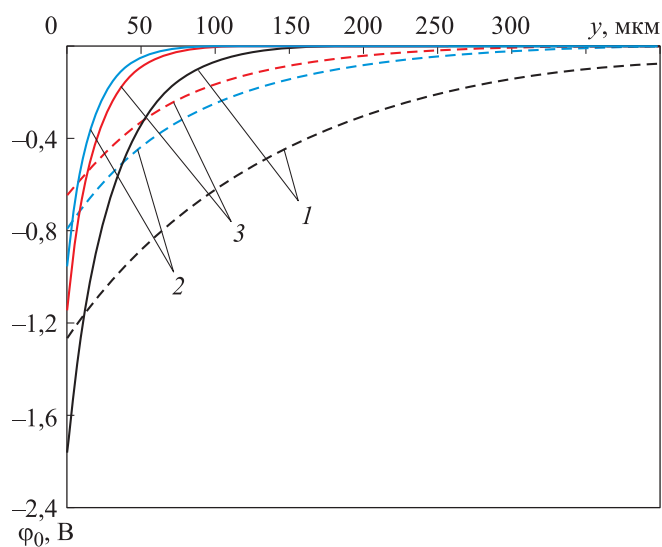


**Рис. 1.** Средневзвешенные значения плавающего потенциала на идеальной стенке РДТТ (КР и А — критическое и выходное сечения сопла)

Согласно рис. 1, увеличение давления в КС не приводит к существенному изменению значения плавающего потенциала. Однако уменьшение давления по длине РДТТ от КС к выходному сечению сопла приводит к снижению модуля плавающего потенциала.



Распределение потенциала вдоль направления нормали  $y$  к идеальной заряженной стенке с ранее определенным плавающим потенциалом, полученным по (2), приведено на рис. 2. Расчет выполнялся для трех модельных составов (ЭКС1, ЭКС2 и ЭКС3) при давлении в КС РДТТ  $p_{к1} = 4$  МПа,  $p_{к2} = 6$  МПа,  $p_{к3} = 8$  МПа,  $p_{к4} = 10$  МПа. Радиус Дебая определялся при значениях температуры, соответствующих двум характерным зонам РДТТ (КС и выходному сечению сопла). Радиус принимает значения в диапазоне от 15 до 200 мкм.



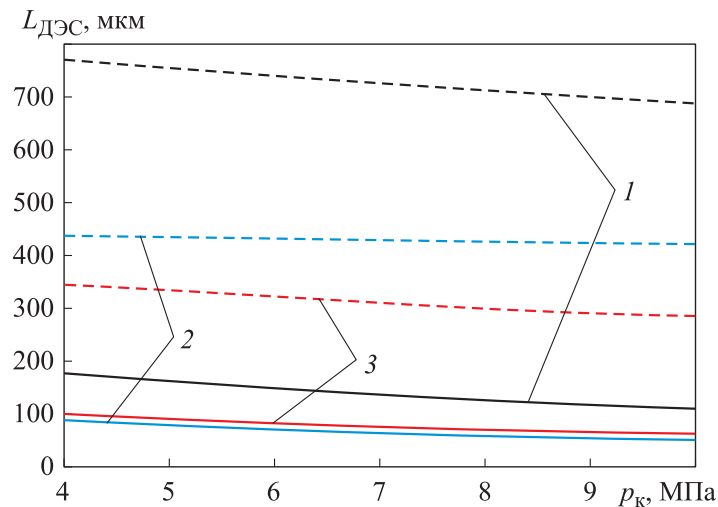
**Рис. 2.** Распределение потенциала вдоль направления нормали  $y$  к идеальной заряженной стенке:  
 1–3 — ЭКС1–ЭКС3 соответственно; сплошная и штриховая — КС и выходное сечение сопла

Наиболее протяженную зону, в которой нарушается квазинейтральность, т. е. большую толщину ДЭС, имеют слабоионизованные ПС состава ЭКС1. При условии равенства давлений и температуре, соответствующей КС, протяженность этой зоны у ПС состава ЭКС1 в 2 раза больше, чем у ЭКС2, и в 1,7 раз больше, чем у ЭКС3. Это связано с большей адиабатной температурой при горении ЭКС1 и с большим содержанием заряженных частиц в ПС данного состава по сравнению с ЭКС2 и ЭКС3.

При уменьшении температуры ПС, что соответствует выходному сечению сопла РДТТ, протяженность указанной зоны у ПС ЭКС1 примерно в 2,3 и 1,7 раза больше, чем у ЭКС3 и ЭКС2, что также связано со степенью ионизации и температурой. Продукты сгорания ЭКС1, в состав которой входит значительное количество окислителя и энергетической

добавки, имеют существенно большую степень ионизации и температуру даже в выходном сечении сопла.

Зависимости толщины ДЭС ( $L_{\text{ДЭС}}$ ) от давления в КС РДТТ и состава ЭКС в двух характерных сечениях (КС и срез сопла) приведены на рис. 3. Расчетами установлено, что при увеличении давления в КС толщина ДЭС уменьшается, поскольку уменьшается радиус Дебая (2), что обусловлено увеличением концентрации заряженных частиц, так как  $n = p / (kT)$ .



**Рис. 3.** Зависимости толщины ДЭС  $L_{\text{ДЭС}}$  от давления в КС РДТТ в двух характерных сечениях (КС и срез сопла):  
1–3 — ЭКС1–ЭКС3 соответственно; сплошная и штриховая — КС и выходное сечение сопла

Следовательно, профиль потенциала у идеальной стенки зависит от значения температуры ПС. Чем выше температура газа, что соответствует более энергоемкому составу (ЭКС1), тем больше протяженность зоны нарушения квазинейтральности (см. рис. 3). Таким образом, использование высокоэнергетических компонентов в ЭКС приведет к появлению у стенки протяженной зоны с потенциалом, отличным от нуля. При этом в случае идеальной стенки, у которой отсутствуют вторичные эмиссионные токи, плавающий потенциал принимает отрицательные значения.

**Выводы.** На основе разработанной математической модели выявлено, что наибольшее влияние на абсолютное значение плавающего потенциала на стенке проточного тракта РДТТ оказывает температура ПС, увеличение последней в 1,8 раза приводит к увеличению в 2 раза модуля плавающего потенциала.

Увеличение давления в КС от 4 до 10 МПа не изменяет плавающий потенциал, однако снижение давления по длине сопла РДТТ уменьшает его в 1,5 раза.

Использование высокоэнергетических компонентов ЭКС приводит к тому, что у стенки проточного тракта РДТТ зона с отличным от нуля потенциалом в КС составляет до 200 мкм, а на срезе сопла — до 800 мкм.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Калинин В.А., Ягодников Д.А. Технология производства ракетных двигателей твердого топлива. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011.
- [2] 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.
- [3] Ягодников Д.А., Воронецкий А.В., Пушкин Н.М. Исследование электризации сопла жидкостного ракетного двигателя. *Физика горения и взрыва*, 1995, т. 31, № 4, с. 54–58.
- [4] Пинчук В.А. Двигательная электризация как явление, отображающее развитие зарядовой неустойчивости в среде продуктов сгорания при истечении. *ЖТФ*, 1997, т. 67, № 8, с. 21–26.
- [5] Котельников В.А., Котельников М.В., Филиппов Г.С. Электрофизические параметры потоков плазмы, истекающих из жидкостных ракетных двигателей. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2018, № 6, с. 13–20.  
DOI: <https://doi.org/10.31857/S023571190002556-2>
- [6] Потапов Г.П. Двигательная электризация летательных аппаратов. Казань, КГТУ, 1995.
- [7] Потапов Г.П., Ившин В.П. К вопросу определения электрофизических характеристик поверхности, находящейся в плотной плазме с добавкой ионизируемого металла. *Труды КАИ*, 1973, № 158, с. 67–73.
- [8] Aronowitz L. Electrostatic potential generated by rockets on vehicles in space. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, 1968, vol. EMC-10, iss. 4, pp. 341–346.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/TEMC.1968.302975>
- [9] Vance E.F., Nanevich J.E. Rocket motor charging experiments. *AFCRL*, 1966, vol. 66, iss. 497.
- [10] Capener E.L., Chown J.B., Dickinson L.A., et al. Studies on ionization phenomena associated with solid propellant rockets. *6th Solid Propellant Rocket Conf., AIAA J.*, 1966, vol. 4, no. 8, pp. 1349–1354. DOI: <https://doi.org/10.2514/3.3676>
- [11] Aronowitz L. Rocket-engine-generated voltage as a source of electromagnetic interference and electronic component damage on interplanetary vehicles. *IEEE Space Electronics Symp.*, 1965, November-2-4.

- [12] Нагель Ю.А. Электризация двигателей при истечении продуктов сгорания. Экспериментальные результаты. *ЖТФ*, 1999, т. 69, № 8, с. 55–59.
- [13] Кучинский В.В., Никитенко А.Б. Аналитические методы оценки параметров плазмы продуктов сгорания и определение температуры по результатам измерений проводимости плазмы. *ЖТФ*, 2010, т. 80, № 8, с. 13–21.
- [14] Guy A., Fromentin-Denoziere B., Phan H.K., et al. Ionized solid propellant rocket exhaust plume: MiLES simulation and comparison to experiment. *7th EUCASS*, 2017, pp. 1–19. DOI: <https://doi.org/10.13009/EUCASS2017-434>
- [15] Митчнер М., Кругер Ч. Частично ионизованные газы. М., Мир, 1976.
- [16] Федотова К.В., Ягодников Д.А. Расчетное исследование предельных характеристик электризации стенки при обтекании низкотемпературной плазмой. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия Естественные науки*, 2023, № 1 (106), с. 145–160. DOI: <http://doi.org/10.18698/1812-3368-2023-1-145-160>
- [17] Нуруллаев Э.М. Основные характеристики смесевых ракетных твердых топлив и области их применения. М., Инфра-Инженерия, 2021.
- [18] Трусов Б.Г. Программная система ТЕРРА для моделирования фазовых и химических равновесий при высоких температурах. *III Междунар. симп. «Горение и плазмохимия»*, 2005, с. 52–57.
- [19] Крамаренко Р.М., Онуфриев В.В. Расчет электризации сопел жидкостных ракетных двигателей. *XLVII Академические чтения по космонавтике*. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023, с. 180–181.

**Федотова Ксения Викторовна** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Ягодников Дмитрий Алексеевич** — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Федотова К.В., Ягодников Д.А. Параметрический расчет предельных характеристик электризации элементов конструкции проточного тракта РДТТ. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2024, № 1 (148), с. 21–35.

EDN: СТТХТХ

## PARAMETRIC CALCULATION OF THE LIMITING CHARACTERISTICS OF ELECTRIZATION OF STRUCTURAL ELEMENTS OF THE SOLID PROPELLANT ROCKET ENGINE EXHAUST DUCT

K.V. Fedotova

fedotova@bmstu.ru

D.A. Yagodnikov

daj@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

---

### Abstract

The paper presents parametric study of the influence of the model power condensed system composition and the combustion products and pressure temperature in the combustion chamber (4–10 MPa) on the floating potential at the internal ideal wall of the solid propellant rocket engine tract and the potential alteration in the double layer. A metal-free model power condensed system was considered, as well as systems based on ammonium perchlorate and inert combustible binder with addition of the powdered aluminum and boron. A mathematical model of floating potential on the charged wall surface was used assuming Maxwellian distribution of electrons in the near-wall area and the collision-free plasma. Weak dependence of pressure in the combustion chamber on the wall floating potential was established; however, the floating potential modulus was decreasing due to a decrease in static pressure along the solid propellant rocket engine duct. It was revealed that the floating potential absolute value on the ideal inner wall of the solid propellant rocket engine duct was growing with the increased temperature of the combustion products of the power condensed system, which provided the greatest influence compared to the other parameters under consideration. The use of a more power-intensive power condensed system leads to an increase in the double electric layer extent, where quasineutrality of the weakly ionized combustion products is disrupted due to an increase in their temperature

### Keywords

*Weakly ionized plasma, electrization, power condensed system, floating potential, double electric layer*

Received 31.07.2023

Accepted 13.11.2023

© Author(s), 2024

---

*This work was supported by the State Program for Fundamental Research of the Ministry of Education and Science of Russian Federation (no. 0705-2020-0044)*

## REFERENCES

- [1] Kalinchev V.A., Yagodnikov D.A. Tekhnologiya proizvodstva raketnykh dvigateley tverdogo topliva [Technology for the production of solid propellant rocket engines]. Moscow, BMSTU Publ., 2011.
- [2] Cherepnin S.N., Dashevskiy V.N. Effect of an external electric field on the combustion parameters and electrification of an electrical plant nozzle. *Combust. Explos. Shock. Waves.*, 1990, vol. 26, no. 6, pp. 690–694. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00786507>
- [3] Yagodnikov D.A., Voronetskiy A.V., Pushkin N.M. Electrification of nozzle in a liquid rocket engine. *Combust. Explos. Shock. Waves*, 1995, vol. 31, no. 3, pp. 450–454. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00789365>
- [4] Pinchuk V.A. Jet engine electrification as a phenomenon reflecting the evolution of charge instability in an outflowing combustion product mixture. *Tech. Phys.*, 1997, vol. 42, no. 8, pp. 872–876. DOI: <https://doi.org/10.1134/1.1258733>
- [5] Kotelnikov V.A., Kotelnikov M.V., Filippov G.S. Electrophysical parameters of plasma flows flowing from liquid rocket engines. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2018, no. 6, pp. 13–20 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31857/S023571190002556-2>
- [6] Potapov G.P. Dvigatel'naya elektrizatsiya letatelnykh apparatov [Propulsion electrization of aircraft]. Kazan, KSTU Publ., 1995.
- [7] Potapov G.P., Ivshin V.P. On the question of determining the electrophysical characteristics of a surface in a dense plasma with the addition of an ionizable metal. *Trudy KAI*, 1973, no. 158, pp. 67–73 (in Russ.).
- [8] Aronowitz L. Electrostatic potential generated by rockets on vehicles in space. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, 1968, vol. EMC-10, no. 4, pp. 341–346. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEMC.1968.302975>
- [9] Vance E.F., Nanevicz J.E. Rocket motor charging experiments. *AFCRL*, 1966, vol. 66, iss. 497.
- [10] Capener E.L., Chown J.B., Dickinson L.A., et al. Studies on ionization phenomena associated with solid propellant rockets. *6th Solid Propellant Rocket Conf., AIAA J.*, 1966, vol. 4, no. 8, pp. 1349–1354. DOI: <https://doi.org/10.2514/3.3676>
- [11] Aronowitz L. Rocket-engine-generated voltage as a source of electromagnetic interference and electronic component damage on interplanetary vehicles. *IEEE Space Electronics Symp.*, 1965, November-2-4.
- [12] Nagel Yu.A. Electrical charging of engines in the efflux of combustion products. Experimental results. *Tech. Phys.*, 1999, vol. 44, no. 8, pp. 918–922. DOI: <https://doi.org/10.1134/1.1259405>
- [13] Kuchinskiy V.V., Nikitenko A.B. Analytical methods for estimating combustion product plasma parameters and determination of temperature by measuring the plasma conductivity. *Tech. Phys.*, 2010, vol. 55, no. 8, pp. 1087–1096. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063784210080037>

- [14] Guy A., Fromentin-Denoziere B., Phan H.K., et al. Ionized solid propellant rocket exhaust plume: MiLES simulation and comparison to experiment. *7th EUCASS*, 2017, pp. 1–19. DOI: <https://doi.org/10.13009/EUCASS2017-434>
- [15] Mitchner M., Kruger C.H. Partially ionized gases. Wiley, 1973.
- [16] Fedotova K.V., Yagodnikov D.A. Computational study of the wall electrization limiting characteristics at the low-temperature plasma flow. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2023, no. 1 (106), pp. 145–160 (in Russ.). DOI: <http://doi.org/10.18698/1812-3368-2023-1-145-160>
- [17] Nurullaev E.M. Osnovnye kharakteristiki smesevykh raketnykh tverdykh topliv i oblasti ikh primeneniya [Main characteristics of mixed rocket solid propellants and areas of their application]. Moscow, Infra-Inzheneriya Publ., 2021.
- [18] Trusov B.G. [TERRA software system for modeling phase and chemical equilibria at high temperatures]. *III Mezhdunar. simp. "Gorenie i plazmokhimiya"* [III Int. Symp. Combustion and Plasma Chemistry], 2005, pp. 52–57 (in Russ.).
- [19] Kramarenko R.M., Onufriev V.V. [Calculation of electrification of nozzles of liquid rocket engines]. *XLVII Akademicheskie chteniya po kosmonavtike* [XLVII Academic Readings on Cosmonautics]. Moscow, BMSTU Publ., 2023, pp. 180–181 (in Russ.).

**Fedotova K.V.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of the Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Yagodnikov D.A.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of the Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Fedotova K.V., Yagodnikov D.A. Parametric calculation of the limiting characteristics of electrization of structural elements of the solid propellant rocket engine exhaust duct. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2024, no. 1 (148), pp. 21–35 (in Russ.). EDN: CTTXTX