

03;04;12

## Электризация двигателей при истечении продуктов сгорания. Экспериментальные результаты

© Ю.А. Нагель

Исследовательский центр им. М.В. Келдыша  
125438 Москва, Россия

(Поступило в Редакцию 13 июля 1998 г.)

Экспериментально исследуется электризация тепловых реактивных двигателей при истечении продуктов сгорания. Приводятся результаты измерений электрического тока за срезом сопла в зависимости от таких параметров, как характерная длина зоны пространственного заряда, электрический потенциал двигателя и давление окружающей среды. Обсуждается возможность приложения полученных результатов к решению практических задач (оценка тока зарядки, скорости роста и максимального значения потенциала летательного аппарата).

### Введение

Одним из основных источников зарядов статического электричества на летательных аппаратах являются тепловые реактивные двигатели, при функционировании которых имеет место вынос заряженных частиц продуктами сгорания [1]. Этот эффект, получивший название двигательной электризации, может быть причиной нежелательных процессов (электрических разрядов на борту летательного аппарата, помех системам управления и радиосвязи, возмущающего воздействия на ионосферную плазму и т.д.). Проведение в связи с этим практических работ по повышению надежности летательных аппаратов привлекло внимание исследователей к проблеме двигательной электризации.

Из совокупности факторов, дающих вклад в механизм двигательной электризации, исследовались два: нарушение в пристеночном слое условия квазинейтральности продуктов сгорания, представляющих собой слабоионизованный многокомпонентный газ [2,3], и развитие неустойчивостей в распределении электрического заряда во всем объеме истекающих продуктов сгорания [4]. Причиной образования пространственного заряда вблизи стенки канала является различие тепловых скоростей электронов и ионов, что в движущемся газе вызывает электрический ток вдоль стенки  $J_w$ , а при истечении из канала (сопла) — ток в затопленном пространстве  $I_a$ . В одномерном приближении [2]

$$J_w = e \int_0^{\delta} [n_i(x) - n_e(x)] v(x) dx, \quad (1)$$

где  $J_w$  — величина тока, приходящегося на единицу длины поперечного контура канала;  $n_i(n_e)$  — концентрация ионов (электронов);  $\delta$  — толщина слоя пространственного заряда;  $v(x)$  — скорость истечения, ось  $Ox$  направлена перпендикулярно поверхности.

Вычисления тока  $J_w$  проведены для трех гипотетических случаев: максвелловского распределения электронов по скоростям и бесстолкновительного движения ионов в пределах заряженного слоя [2], идеально

отражающей и поглощающей заряженные частицы поверхностей [3]. Ток  $J_w$  положителен и его величина при прочих равных условиях тем больше, чем выше концентрация заряженных частиц (выше температура и ниже потенциал ионизации продуктов сгорания).

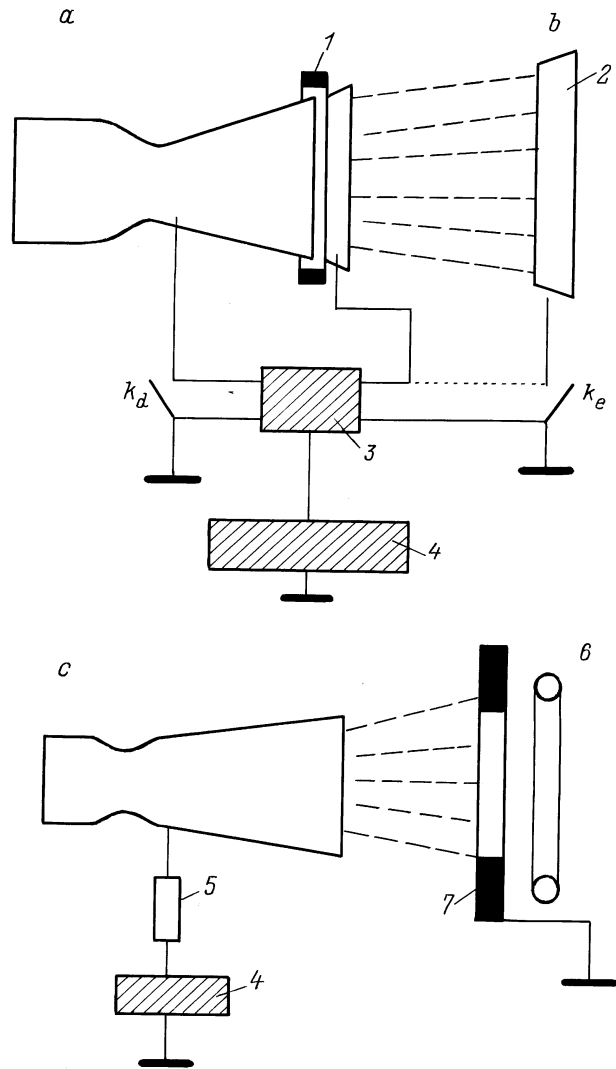
Развитие неустойчивостей в распределении электрического заряда связано с акустическим воздействием, в результате которого в объеме продуктов сгорания возникают макроскопические флуктуационные образования. Их характерные геометрический и временной масштабы существенно превосходят соответствующие значения радиуса Дебая и времени столкновения электронов с нейтральными атомами. Знак нескомпенсированного заряда, выносимого в затопленное пространство, и соответственно тока  $I_a$  изменяется с положительного на отрицательный при снижении исходной концентрации заряженных частиц [4].

Кроме учета вклада в механизм двигательной электризации этих факторов, косвенно (при задании исходных данных и граничных условий на стенке канала) могут быть учтены термоэлектронная эмиссия со стенок и содержащихся в продуктах сгорания макрочастиц, осаждение электронов на макрочастицах, наличие в топливах примесей легкоионизируемых щелочных металлов и др. Основанная на подобных представлениях картина двигательной электризации в целом не противоречит имеющимся экспериментальным данным [1–3,5–7]. Однако эти данные ограничены по объему, к тому же получены на различной методической основе и в неидентичных условиях, что затрудняет дальнейшее научное осмысление двигательной электризации и уточнение физико-математической модели ее механизма. В данной работе приводятся обобщенные результаты экспериментальных исследований электризации тепловых реактивных двигателей на жидких и твердых топливах. По сравнению с известными ранее [1–3,5–7] приводимые результаты отличаются тем, что содержат большее число определяющих параметров (связанных как с внутриводительными процессами, так и внешними условиями) и получены на основе единого методического подхода.

## Постановка эксперимента. Методика измерений

Исходные соображения по постановке эксперимента основывались на результатах решения одномерной модельной задачи о течении заряженного газа за срезом источника униполярного заряда [8] и сводились к следующему. В общем случае ток в затопленном пространстве  $I_a$  должен зависеть от внутренних (чисто двигательных) и внешних условий. Под внешними условиями следует понимать набор параметров, определяющих плотность пространственного заряда за срезом сопла: характерных величин длины зоны пространственного заряда  $l_a$ , электрического потенциала двигателя  $U$  и напряженности электрического поля на срезе  $E_a$ . Напряженность поля  $|E_a| \leq \min\{E_p, E_s\}$ , где  $E_p(E_s)$  — электрическая прочность продуктов сгорания (окружающей среды). Если  $l_a \rightarrow 0$ , то ток  $I_a \rightarrow I_m$ , где  $I_m$  — максимальный ток (ток насыщения), величина которого определяется только внутренними условиями: составом, температурой, давлением продуктов сгорания и т. п.

Выбранные в соответствии с этими соображениями схемы измерений приведены на рис. 1. Фиксация параметра  $l_a$  осуществлялась с помощью устанавливаемых за срезом профилированного электрода или нейтрализатора. Если электрод устанавливался так, что его внутренняя поверхность омывалась холодной, практически неионизованной периферической частью струи (рис. 1, b), то он выполнял функции коллектора дрейфующих в радиальном направлении нескомпенсированных зарядов в струе и ток в цепи измерения  $I \approx I_a$ . При размещении электрода в непосредственной близости от среза и выборе профиля его внутренней поверхности, являющегося продолжением профиля сопла, электрод омывается горячей частью (фактически ядром) струи и поэтому процессы, приводящие к электризации, могут в равной степени проявляться на стенках сопла и электрода. Измеряемый в этом случае сигнал равен разности токов, поступающих на электрод и двигатель,  $I = I_e - I_d$ , а ток в струе на участке срез–электрод  $I_a = kI$ , где  $k$  — коэффициент, подлежащий определению. Если зазор между срезом и электродом мал и можно пренебречь изменением (на длине зазора и электрода) параметров продуктов сгорания, то при  $I_e \sim D_e$   $I_d \sim D_a$ , где  $D_e(D_a)$  — диаметр среза электрода(сопла), коэффициент  $k = 1/(D_e/D_a - 1)$ . Использование нейтрализатора позволяло избежать непосредственного контакта электродов со струей. Нейтрализация нескомпенсированного заряда струи достигалась путем формирования электрического заряда требуемых плотности и полярности в коронном разряде между электродами 6, 7 (рис. 1, c), подсоединяемыми к источнику высокого напряжения. Измеряемый сигнал  $I \approx I_a$ . Во избежание электрического разряда на двигатель и наводок в измерительной цепи нейтрализатор устанавливался на некотором расстоянии от среза сопла. Схема с "горячим" электродом применялась при расчетном истечении и  $l_a/D_a < 0.2$ . В



**Рис. 1.** Схемы измерения с "горячим" (a), "холодным" (b) электродами и нейтрализатором (c): 1 — изолятор; 2 — электрод; 3 — усилитель тока; 4 — шлейфовый осциллограф; 5 — нагрузочное сопротивление; 6, 7 — кольцевые коронирующий и экранирующий электроды.

этом случае достаточно было ограничиться измерительными приборами в цепи электрода (ключ  $k_e$  на рис. 1 разомкнут), что существенно тогда, когда изолирование двигателя от "земли" было затруднительно (ключ  $k_d$  замкнут). В случае нерасчетного истечения, а также при  $l_a/D_a \geq 0.2$  измерения проводились по схеме с "холодным" электродом (двигатель заземлен) или нейтрализатором (двигатель изолирован). Сравнительные испытания, проведенные при  $l_a/D_a \approx 0.2$  с помощью трех перечисленных схем, показали удовлетворительные согласие получаемых данных. Для изменения потенциала двигателя  $U$  использовалось переменное нагрузочное сопротивление  $R_n$  (5 на рис. 1). В атмосферных условиях варьирование параметра  $E_a$  исключалось. Это становилось возможным при помещении малоразмерных двигателей в вакуумные камеры.

## Результаты измерений и их обсуждение

Измерения были проведены на ряде двигателей, отличающихся типом топлива, давлением  $P_0$  и температурой  $T_0$  в камере сгорания, диаметрами критического сечения  $D_C$  и среза сопла  $D_a$  (табл. 1).

Таблица 1.

№ двигателя	Топливо	$P_0$ , МПа	$T_0$ , К	$D_C$ , мм	$D_a$ , мм
1	Жидкое	0.3	3100	3.5	10
2	»	0.6	3150	5.0	30
3	»	0.6	3150	5.0	30
4	»	0.6	3150	7.0	40
5	»	0.6–0.7	3150	10	13
6	»	0.6–0.7	3150	12.1	87
7	Твердое	4.0	3300	18	40
8	»	5.6	2300	29	60
9	»	3.0–4.5	3480	36–39	90
10	»	5.7	3600	225	1575
11	»	3.2	3400	250	1125

Результаты измерения тока  $I_a$  при  $l_a/D_a \leq 0.2$  и  $R_n = 0$  приведены в табл. 2.

Таблица 2.

№ двигателя	Эксперимент		$J_w$ , $\mu\text{A}/\text{m}$	
	$I_a$ , $\mu\text{A}$	$I_a/\pi D_a$ , $\mu\text{A}/\text{m}$	поглощающая стенка	отражающая стенка
1	0–0.6	0–20	–	–
5	0–5	0–120	–	–
6	0–9	0–50*	–	–
7	50–200	470–1880	590	2000
9	100–700	350–2450	590	2000
10	750–4500	127–765	120	410
11	500–750	175–260*	330	450

Знак \* относится к течению в сопле с отрывом в сечении с  $D_{ef} < D_a$ . В этом случае значение  $D_a$  заменялось на расчетное значение  $D_{ef}$ . На всех исследованных двигателях наблюдались значительные пульсации тока  $I_a$  (о характере и возможных причинах пульсаций тока см. в [3]). Этот факт отражен в табл. 2 указанием характерного диапазона пульсаций. При экспериментах на двигателях 7, 9–11, в том числе при произвольных значениях  $l_a/D_a$ , знак тока  $I_a$  был положительным (т. е. двигатели электризовались отрицательно), переплюсовка тока не наблюдалась, что послужило основанием для предположения о существенном вкладе пристеночного тока  $J_w$  в механизм двигательной электризации. Обоснованности этого предположения свидетельствуют приведенные результаты выполненных, согласно [3], расчетных оценок  $J_w$ , которые качественно согласуются с границами диапазона экспериментальных данных по  $I_a$ . В случае двигателей 1–6, 8 знак  $I_a$  не был постоянным,

он мог изменяться при повторных экспериментах. Более того, из трех одинаковых по конструкции двигателей 2–4 один электризовался преимущественно положительно, а два других — отрицательно. Сказанное иллюстрирует рис. 2, где приведены зависимости электрического заряда  $q(t) = -\int_0^t I_a \cdot dt$ , стекающего через измерительную цепь с двигателей, от времени для нескольких повторяющихся идентичных по условиям проведения экспериментов при  $l_a/D_a > 50$  и  $R_n = 0$ . Одна из возможных причин изменения знака — зависимость тока от коэффициента избытка окислителя  $\alpha$  в работающих на жидких топливах двигателях, обнаруженная в [5] (задаваемое значение  $\alpha$  для двигателей 1–6 составляло 0.6–0.8). Заметное влияние на ток  $I_a$  оказывал унос материала конструкции двигателя, однако изменение знака не наблюдалось. На рис. 3 приведены усредненные (по 5–10 экспериментам) кривые  $q(t)$  для трех различных материалов вкладышей для критической части (фторопласт-4, молибден, графит), дающих различный унос: 105, 62,  $\sim 0$  г/с. Факт снижения тока  $I_a$  с увеличением уноса материала имеет простое физическое объяснение: продукты уноса (в газовой и конденсированной фазах) вызывают снижение концентрации электронов в продуктах сгорания из-за снижения температуры в пограничном слое вследствие эффекта завесного охлаждения и поглощения части электронов макрочастицами [9].

Результаты экспериментального определения зависимости  $I_a$  от  $l_a$  при  $R_n = 0$ , полученные на двигателе 9 и модельных заряженных струях (часть данных была опубликована автором ранее [3]), обобщены на рис. 4. В качестве безразмерных координат выбраны величины  $l'_a = l_a/l_n$ , где  $l_n$  — длина начального участка струи [10],  $I'_a = 0.735 I_a(l'_n)/I_a(2)$  [3]. Несмотря на существенные различия в условиях проведения экспериментов, в выбранных координатах полученные данные группируются в достаточно узком коридоре, что дает основание предположить универсальный характер зависимости  $I'_a(l'_a)$ . Т. е. требуемое для конкретных условий значение  $I_a(l_a)$  может быть приближенно определено, если известно значение  $I_a$  для какой-либо фиксированной величины  $l_a$ . Связь между током  $I_a$  и потенциалом двигателя (вольт-амперная характеристика) определялась при варьировании нагрузочного сопротивления (рис. 1) в диапазоне  $0 \leq R_n \leq \infty$ . Полученные данные в координатах  $I_a^* = I_a/I_a(R_n = 0)$  и  $U^* = U/U(R_n = \infty)$  приведены на рис. 5. На основе этих данных можно построить приближенную вольт-амперную характеристику в размерных величинах, если известны две точки, например ток при  $R_n = 0$  и потенциал при  $R_n \rightarrow \infty$ .

Влияние давления окружающей среды (высоты полета) на величину  $E_a$  и соответственно ток  $I_a$  исследовались на малоразмерных двигателях, помещенных в барокамеру. Результаты приведены на рис. 6. В диапазоне давлений  $10^2$ – $10^3$  Па величина тока мала, за пределами этого диапазона она увеличивается. Зависимость  $I_a$  от давления напоминает известную кривую Пашена в теории газового разряда.

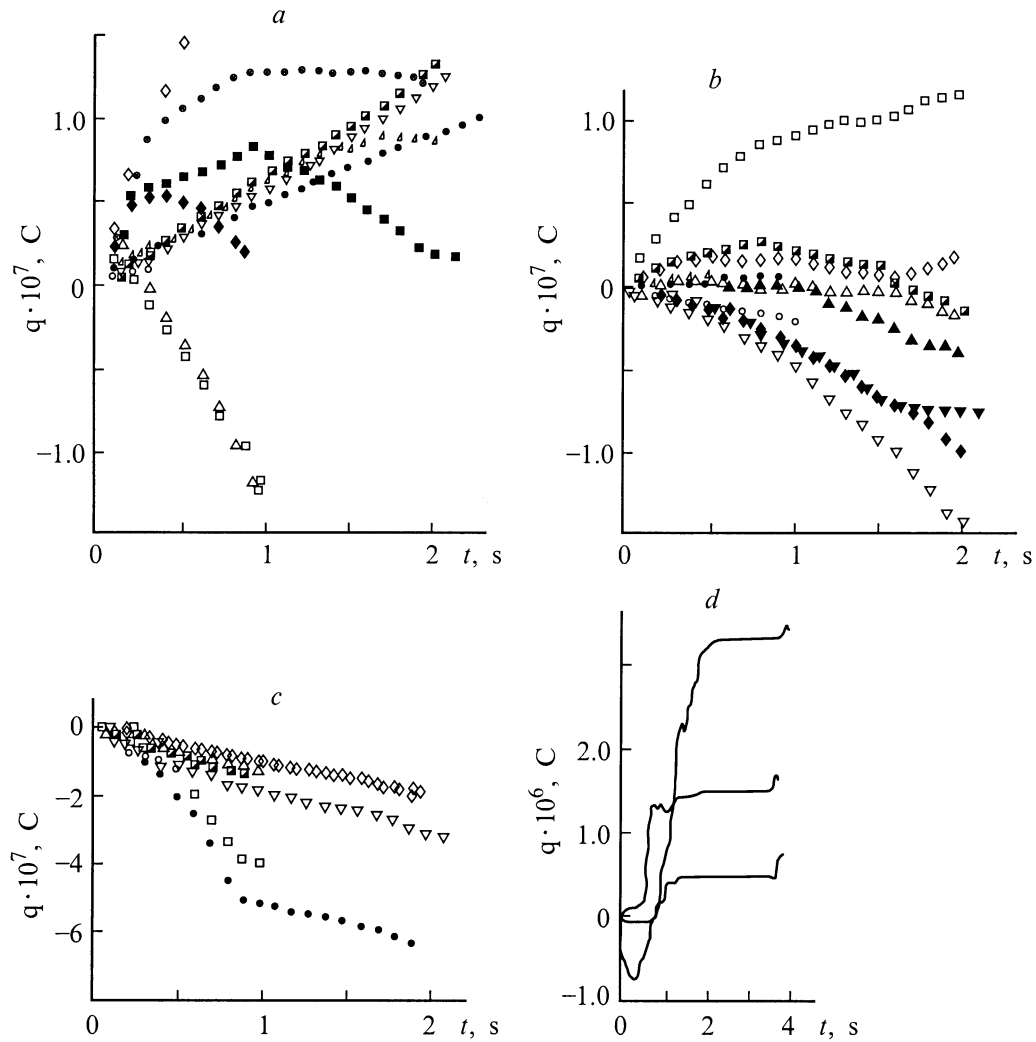


Рис. 2. Зависимость  $q(t)$  для двигателя 2 (a), 3 (b), 4 (c) и 8 (d).

## Заключение

В результате проведенных экспериментальных исследований измерены значения электрического тока  $I_a$  при  $l_a/D_a \rightarrow 0$ , представляющего максимально возможный ток  $I_m$  на срезе сопла двигателя и являющегося чисто двигательным параметром, зависящим только от его характеристик, и определены зависимости тока  $I_a$  от трех основных параметров, влияющих на его значение длины зоны пространственного заряда  $l_a$ , электрического потенциала двигателя  $U$  и давления окружающей среды  $p$ . Приложение полученных результатов к решению практических задач (оценка тока зарядки  $I_d = -I_a$ , скорости роста и максимального значения потенциала летательного аппарата) возможно, если для конкретных условий известны величины  $I_m$ ,  $l_a$ ,  $U$  и  $p$ . Величина  $l_a$  будет зависеть от целого ряда факторов: подвижности заряженных частиц, степени ионизации продуктов сгорания, параметров окружающей среды и др. и нахождение ее представляет собой самостоятельную задачу (так, по оценкам, на высоте 400–500 км  $4-6 < l_a/D_a < L/D_a$ ,

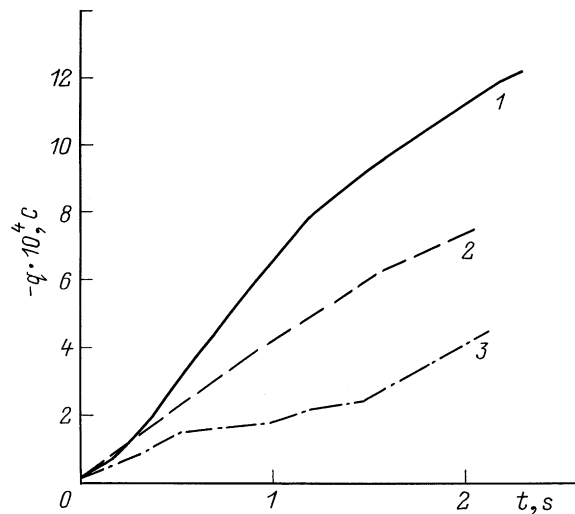
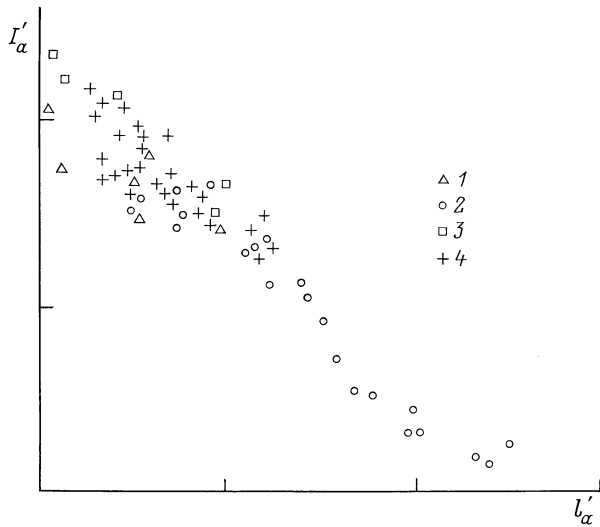
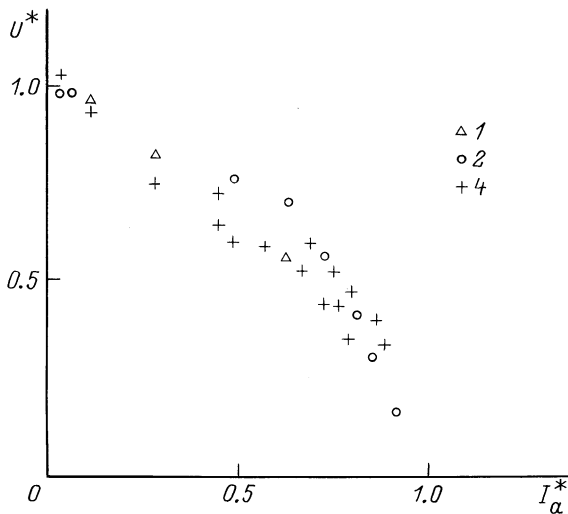


Рис. 3. Зависимость  $q(t)$  для  $l_a/D_a \approx 0.1$  (двигатель 9): 1 — графит, 2 — молибден, 3 — фторопласт.



**Рис. 4.** Зависимость тока в затопленном пространстве  $I_a$  от длины зоны пространственного заряда: 1 — двигатель 9, степень нерасчетности [10]  $n = 1-1.5$ , степень подогрева [10]  $\Theta = 7$ ; 2 — водяной пар;  $P_0 = 0.7, 1.3$  МПа;  $P_a = 0.1$  МПа;  $D_c = 2.0, 1.1$  мм,  $D_a = 2.35, 1.3$  мм,  $n = 1.3, 2.45$ ,  $\Theta = 1.35, 1 \dots 45$ ; 3 — пар кремнийорганической жидкости;  $P_0 = 0.28$  МПа;  $P_a = 0.07$  МПа;  $D_c = D_a = 2$  мм;  $n = 2.3$ ;  $\Theta = 1.1$ ; 4 — пар фторорганической жидкости;  $P_0 = 0.12$  МПа;  $P_a = 0.03$  МПа;  $D_c = 2.0$  мм;  $D_a = 2.0, 3.0$  мм;  $n = 2.4, 0.5$ ;  $\Theta = 1.05, 0.95$ .

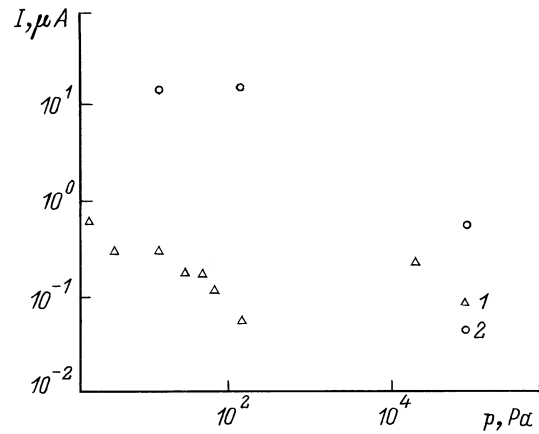


**Рис. 5.** Зависимость тока  $I_a$  от электрического потенциала двигателя:  $l_a/D_a \approx 50$  (1), 15 (2), 12.5–16.5 (4). Все другие параметры соответствуют рис. 4.

где  $L$  — характерный геометрический размер летательного аппарата). Скорость роста потенциала летательного аппарата при включении двигателя

$$\left[ \frac{dU}{dt} \right]_{U=U_0} = \frac{I_d}{C_1 + C_2},$$

где  $C_1, C_2$  — емкости летательного аппарата и системы летательный аппарат–Земля.



**Рис. 6.** Зависимость тока  $I_a$  от давления окружающей среды: 1 — двигатели 2, 3,  $l_a/D_a \approx 50$ ; 2 — двигатель 6,  $l_a/D_a \leq 0.2$ .

Максимальное значение потенциала может быть оценено из условия баланса токов зарядки и разрядки по точке пересечения соответствующих вольт-амперных характеристик.

Автор выражает признательность П.П. Андрееву, В.А. Никольскому и С.Г. Реброву за содействие в проведении экспериментов.

### Список литературы

- [1] Ватажин А.Б., Грабовский В.И., Лихтер В.А., Шульгин В.И. Электрогазодинамические течения. М.: Наука, 1983. 344 с.
- [2] Aronowitz L. // IEEE Trans. on Electromagn. Compability. Vol EMC-10, 1968. N 4. P. 341–346.
- [3] Нагель Ю.А. // ТВТ. 1987. Т. 25. № 6. Деп. от 8.06.87. № 4115-В-87.
- [4] Пинчук В.А. // ЖТФ. 1997. Т. 67. Вып. 8. С. 21–26.
- [5] Шкаликов В.А. // Тепловые процессы и свойства рабочих тел двигателей летательных аппаратов / Под ред. В.Е. Алемасова. Казань: КАИ, 1980. С. 41–47.
- [6] Шкаликов В.А., Лебедев А.А., Кульжанов Ж.К. // Тепловые процессы и свойства рабочих тел двигателей летательных аппаратов / Под ред. В.Е. Алемасова. Казань: КАИ, 1982. С. 79–83.
- [7] Brunet A., Faure F. // La Recherche Aerospaciale. 1990. N 1. P. 29–38.
- [8] Нагель Ю.А. // ПМТФ. 1971. С. 24–32.
- [9] Соу С. Гидродинамика многофазных систем. М.: Мир, 1971. 536 с.
- [10] Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. М.: ГИТТЛ, 1960. 715 с.