

01;03

Двигательная электризация как явление, отображающее развитие зарядовой неустойчивости в среде продуктов сгорания при истечении

© В.А. Пинчук

Балтийский государственный технический университет,
198005 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 12 января 1996 г. В окончательной редакции 12 апреля 1996 г.)

Выдвигается и исследованиями обосновывается предположение о вкладе в механизм двигательной электризации тепловых реактивных двигателей зарядовых неустойчивостей, развивающихся в среде продуктов сгорания при истечении из камер.

Введение

Как явление двигательная электризация (ДЭ) тепловых реактивных двигателей (ТРД) до настоящего времени не получила необходимого физического осмысления. Наиболее часто развиваемые представления о ДЭ как процессе, обусловленном по существу выносом электричества из камер в составе граничащих со стенками электрически заряженных объемов газа при истечении слабоионизированных продуктов сгорания (ПС) в окружающее пространство [1,2], не отвечают (если не противоречат) ряду ее общих экспериментально обнаруживаемых характеристик.

Отмеченная модель не подтверждается, в частности, исследованиями распределения выносимого из камеры РД заряда по потоку: наблюдаемые распределения токов выноса не обнаруживают преимущественной концентрации заряда в периферийных слоях и соответствуют распределениям электричества по сечениям в струях с униполярным ионным зарядом [3].

С позиций отмеченных представлений затруднительно обосновать и общие особенности фиксируемых зависимостей знака выносимого из камер заряда от режимов работы двигателей. Так, экспериментальными исследованиями ДЭ убедительно показывается, что высокотемпературные режимы работы двигателей приводят, как правило, к выносу из камер положительного электричества. В то же время для низкотемпературных режимов (генераторных), напротив, наиболее характерен вынос из камер отрицательного заряда [2–4].

Известен подход, когда явление ДЭ обосновывают "вмороженностью" заряженных частиц в среду продуктов сгорания, т.е. их малой подвижностью, предполагая при этом, что носителями электрического заряда в камере являются в основном мелкие углеродсодержащие частицы несгоревшего топлива [3]. Однако ДЭ как явление свойственно в целом классу тепловых реактивных двигателей, в том числе и не использующих в составе топлива углеродсодержащих веществ (например, использующих в качестве горючего водород). Более того, экспериментальные наблюдения ДЭ не обнаруживают каких-либо принципиальных изменений в характере ее

протекания в связи с наличием или, напротив, отсутствием углеродсодержащих компонент в составе топлива [4].

Иными словами, совокупное обоснование фиксируемых наблюдениями характеристик ДЭ в настоящее время не сформулировано. При этом общие результаты попыток формирования портрета ДЭ указывают на принципиальную недостаточность разрешающих возможностей традиционно используемых в этих целях моделей характеристикам ДЭ как объекта физического исследования.

Отмеченная в целом ситуация позволяет, по-видимому, предполагать, что при ограничении состава учитываемых факторов лишь процессами в граничащих со стенками камеры объемах продуктов сгорания и выноса электричества из камер в составе малоподвижных углеродсодержащих частиц несгоревшего топлива, сформулировать научно обоснованные представления о ДЭ представляется затруднительным (если не невозможным).

Не отицая вклада традиционно учитываемых факторов в механизм ДЭ, в настоящей работе выдвигается и исследованиями подтверждается предположение о возможности построения (формирования) представлений о двигательной электризации, в том числе и как о явлении, отображающем развитие зарядовых неустойчивостей в слабоионизированной среде продуктов сгорания при истечении из камер двигателей [5].

Модель механизма

При формировании исходных представлений в рамках сформулированной задачи обратим внимание, что известные экспериментальные материалы исследований ДЭ указывают по существу на существование некоего механизма, который не только обуславливает вклад в развитие двигательной электризации всего потока истекающих из камер продуктов сгорания (а не только его периферийных, граничащих со стенками камеры слоев), но и определяет выходящие за рамки общепринятых представлений фиксируемые наблюдениями зависимости ДЭ от характеристик режима.

Примем во внимание в связи с этим, что продукты сгорания в условиях камер ТРД представляют собой

прежде всего слабоионизированную газовую среду, подвергаемую при истечении в окружающее пространство, интенсивным акустическим возмущениям. С учетом [5] естественно ожидать, что процесс истечения продуктов сгорания из камер в окружающее пространство может сопровождаться развитием в их среде зарядовых неустойчивостей. Характеристики ожидаемых проявлений зарядовых неустойчивостей в виде формируемых в потоке токов выноса в рамках поставленной задачи могли бы представлять в связи с этим особый интерес.

Сконструируем систему, описывающую процесс истечения продуктов сгорания. Описание проведем в представлениях трехжидкостной модели [5]. Отметим, что среди прочих преимуществ последняя снимает необходимость детально оценивать состав среды: как индивидуальные особенности состава, так и возможности их существенных различий допустимо учитывать в этом случае конкретным определением либо, напротив, варьированием в широких диапазонах одной из важных характеристик ионизированных сред — эффективного значения потенциала ионизации.

В обозначениях [5] с учетом стационарности задачи и в одномерном представлении состав системы определим уравнениями движения электронной

$$m_e n_e U_e \frac{\partial U_e}{\partial x} + \frac{en_e}{\mu_e} (U_e - U_a) + \frac{\partial p_e}{\partial x} - en_e E = 0 \quad (1)$$

и ионной компонент

$$m_i n_i U_i \frac{\partial U_i}{\partial x} + \frac{en_i}{\mu_i} (U_i - U_a) + \frac{\partial p_i}{\partial x} - en_i E = 0; \quad (2)$$

условием ионизационного равновесия в форме Саха условного состава трехжидкостной среды, представляемом в виде

$$\frac{\alpha \eta}{(1 - \alpha)(1 + \eta)} - 6.666798_{10^{-2}} \frac{T^{5/2}}{p} \exp\left(-\frac{eV}{kT}\right) = 0; \quad (3)$$

выражениями для среднемассовых плотности

$$\rho_\Sigma - \frac{m_e \eta + m_i \alpha + m_a (1 - \alpha)}{1 + \eta} \frac{p}{kT} = 0 \quad (4)$$

и скорости

$$U_\Sigma \left[\eta + \frac{m_i}{m_e} \alpha + \frac{m_a}{m_e} (1 - \alpha) \right] - U_e \eta - \frac{m_i}{m_e} U_i \alpha - \frac{m_a}{m_e} U_a (1 - \alpha) = 0 \quad (5)$$

трехжидкостной среды; уравнением неразрывности потока

$$\rho_\Sigma \bar{F} \frac{\partial U_\Sigma}{\partial x} + \rho_\Sigma U_\Sigma \frac{\partial \bar{F}}{\partial x} + U_\Sigma \bar{F} \frac{\partial \rho_\Sigma}{\partial x} = 0; \quad (6)$$

законом сохранения электрического заряда

$$U_\Sigma \bar{F} \frac{\partial q}{\partial x} + j_k \frac{\partial \bar{F}}{\partial x} + \bar{F} \frac{\partial j_k}{\partial x} = 0; \quad (7)$$

уравнением Пуассона для электрической составляющей поля

$$\frac{\partial E}{\partial x} - \frac{e}{\varepsilon_0} \frac{\alpha - \eta}{1 + \eta} \frac{p}{kT} = 0. \quad (8)$$

С учетом связей между параметрами, а также выражений для подвижностей компонент μ_e , μ_i , плотностей избыточного заряда q и конвективного тока j_k [5] система приводится к восьми линейно независимым уравнениям относительно одиннадцати неизвестных U_e , U_i , U_a , ρ_Σ , U_Σ , α , η , E , p , T , \bar{F} .

Дополним далее (1)–(8) уравнением связей между давлением и температурой среды при изоэнтропическом течении

$$T = T_0 \left(\frac{p}{P_0} \right)^{\frac{n-1}{n}}, \quad (9)$$

а также соотношением для уширения сопла как функции относительного давления в потоке и показателя процесса

$$\bar{F} = \frac{\left(\frac{2}{n+1} \right)^{\frac{1}{n-1}} \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^{0.5}}{\left[\left(\frac{p}{P_0} \right)^{2/n} - \left(\frac{p}{P_0} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right]^{0.5}}. \quad (10)$$

Замыкание системы и в целом возможность использования разработанного в [5] аппарата для получения количественных оценок в рамках поставленной задачи обеспечим принятием зависимости, устанавливающей характерное для ТРД распределение давления по длине сверхзвуковой части сопла

$$p = p^* \left(\frac{p_a}{p^*} \right)^{\left(\frac{x}{L_a} \right)}. \quad (11)$$

Здесь $x \in [0, L_a]$ — линейная координата;

$$p^* = P_0 \left(\frac{2}{n+1} \right)^{\frac{n}{n-1}}$$

— давление в критическом сечении сопла. Системой (1)–(11), таким образом, проведено электрогазодинамическое описание процесса истечения продуктов сгорания из камеры ТРД. Электрическая связь между потоком и стенками сопла при этом не учитывается.

Характер исследований. Результаты

Система (1)–(11) использовалась для исследований характеристик сверхзвукового участка потока при истечении ПС из камер. При этом предполагалось, что электрофизические параметры потока ПС в критическом сечении сопла являются невозмущенными, т. е. отвечают общим условиям квазинейтральности и характеризуются отсутствием внутренних электрических полей.

С учетом отмеченных физических представлений формировались разностная схема, а также начальные условия интегрирования

$$x=0 : U_e = U_i = U_a = U_\Sigma = [nRT_0 / (n+1)]^{0.5} = W^* = a^*,$$

$$\alpha = \eta = f(T^*, p^*, V), \quad E = 0, \quad \rho_\Sigma = \rho^*, \quad p = p^*, \\ T = T^*, \quad \bar{F} = 1.$$

Задача исследований, таким образом, сводилась к численному интегрированию системы (1)–(11) в области $x \in [0, L_a]$, L_a — длина сверхзвуковой части сопла. В процессе интегрирования на каждом шаге проверялось выполнение условия $\text{mod } E < E_{bd}$, где E_{bd} — пробойная напряженность электрического поля (условно принималась равной 10^7 В/м). При нарушении этого условия интегрирование прекращалось.

Аналогично [5] оценивались и комплексные характеристики, такие как j_k — плотность тока выноса, q — обусловленная зарядовой неустойчивостью локальная плотность электрического заряда, ξ — степень нарушения квазинейтральности среды и т.д. Конкретные условия варианта расчета определялись заданием P_0 — давления в камере, p_a — давления ПС в сечении среза сопла, T_0 — температуры ПС в камере,

n — показателя процесса истечения, V — потенциала ионизации условной трехжидкостной среды, L_a — длины сопла. Входные параметры при расчетах широко варьировались: $P_0 \in (0.3, 5)$ МПа; $p_a \in (0.05, 0.5)$ МПа; $T_0 \in (1500, 3500)$ К; $n \in (1.1, 1.4)$; $L_a \in (0.5, 1.5)$ м; $V \in (6, 16)$ В. При выборе P_0 и p_a , однако, обеспечивалось условие $P_0/p_a \leq 10$. Общепринятое мнение о степени соответствия условиям ионизационного равновесия, согласно (3), состава среды ПС при истечении из камер реальных ТРД в настоящее время окончательно не сформировано. Поэтому расчеты по описанной методике дублировались расчетами, в которых степень ионизации по длине сопла рассматривалась "замороженной" (уравнение Саха при прочих равных условиях использовалось в этих случаях лишь на стадии формирования начальных условий для численного эксперимента; в дальнейшем же, при интегрировании системы, оно исключалось из рассмотрения).

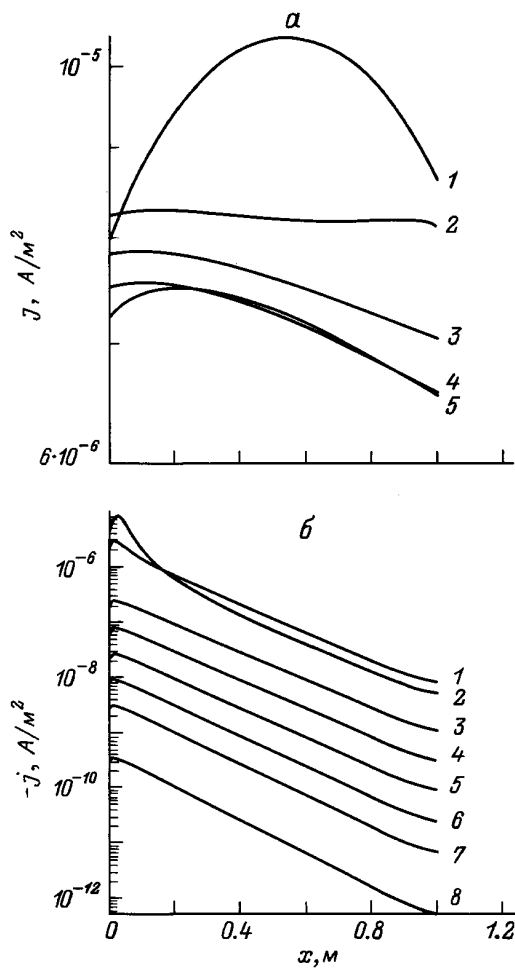


Рис. 1. Распределение плотности тока по длине сопла в зависимости от состава среды. $P_0 = 0.4$ МПа; $T_0 = 3000$ К; $p_a = 0.1$ МПа; $L_a = 1.0$ м; $n = 1.3$. $V, В$ для a : 1 — 8.5, 2 — 10.5, 3 — 10.0, 4 — 9.5, 5 — 9; для b : 1 — 13.00, 2 — 12.75, 3 — 14.00, 4 — 14.50, 5 — 15.00, 6 — 15.50, 7 — 16.00, 8 — 17.00.

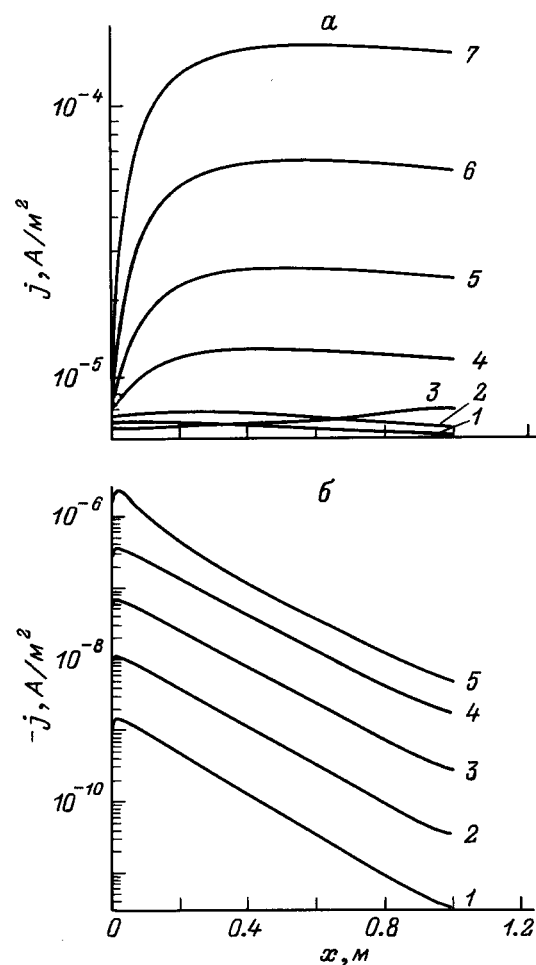


Рис. 2. Распределение плотности тока по длине сопла в зависимости от температуры в камере. $P_0 = 0.4$ МПа; $V = 9$ В; $p_a = 0.1$ МПа; $L_a = 1.0$ м; $n = 1.3$. $T, К$ для a : 1 — 2800, 2 — 3000, 3 — 2500, 4 — 3200, 5 — 3300, 6 — 3400, 7 — 3500; для b : 1 — 1700, 2 — 1800, 3 — 1900, 4 — 2000, 5 — 2100.

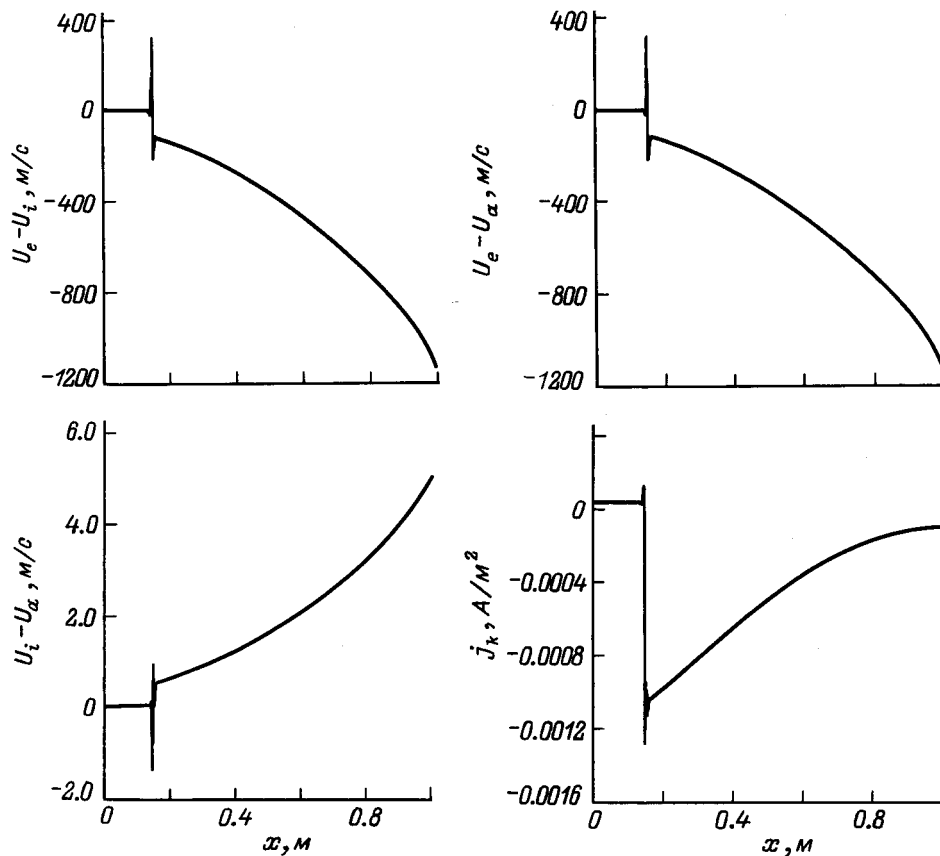


Рис. 3. Распределения $U_e - U_i = f(x)$; $U_e - U_a = f(x)$; $U_i - U_a = f(x)$; $j_k = f(x)$ по длине сопла (соответственно). $P_0 = 0.4$ МПа, $p_a = 0.1$ МПа, $T_0 = 3000$ К, $V = 12.1$ В, $L_a = 1.0$ м, $n = 1.3$.

Общими результатами численного эксперимента обосновывается правомочность формулирования представлений о двигательной электризации как явления, отображающем развитие в слабоионизированной среде продуктов сгорания неустойчивостей в распределении электрического заряда по объему в связи с истечением из камер.

Действительно, решениями обнаруживается, что во всем диапазоне варьирования входных параметров в потоках продуктов сгорания при истечении из сопла необходимо формируются отличные от нуля токи выноса, возникают в связи с этим макроскопического характера образования с избыточным электрическим зарядом (аквазинейтральные), внутренние электрические поля.

Результаты в общем указывают, что в связи с развитием зарядовых неустойчивостей в потоках ПС при истечении возможен вынос из камер как положительного, так и отрицательного электричества. При этом устанавливается, что вероятность выноса положительного заряда с понижением потенциала ионизации или повышением температуры среды при прочих равных условиях возрастает. Напротив, в связи с увеличением потенциала ионизации среды или понижением ее температуры при прочих равных условиях повышается вероятность выноса из камер с потоком отрицательного электричества. Общий характер

результатов при этом сохраняется вне зависимости от варианта расчета (равновесное или "замороженное" по степени ионизации истечение).

На рис. 1 представлены конкретные, полученные решениями распределения по длине сопла плотности токов выноса, отражающие в том числе и отмеченный выше характер зависимости знака выносимого из камеры с потоком ПС электричества от состава истекающей среды. Зависимость плотности токов выноса от температуры продуктов сгорания при прочих равных условиях иллюстрируется рис. 2.

Представленные зависимости хотя и отвечают варианту "ионизационно равновесного" истечения, однако являются типичными и в целом отражают общие особенности полученных результатов. В диапазоне охватываемых исследованиями уровней T_0 и V среды ими, в частности, выявляется существование трех характерных режимов истечения ПС из камер ТРД. Прежде всего это — режим, отличающийся устойчивым по длине сопла выносом из камер положительного электрического заряда. Отмеченный режим реализуется при истечении "высокотемпературных" (или "легкоионизируемых") сред ПС и условно может быть отнесен к группе "камерных" (рис. 1, а; 2, а).

Вторая характерная группа режимов обнаруживается устойчивым по длине сопла выносом из камеры отрица-

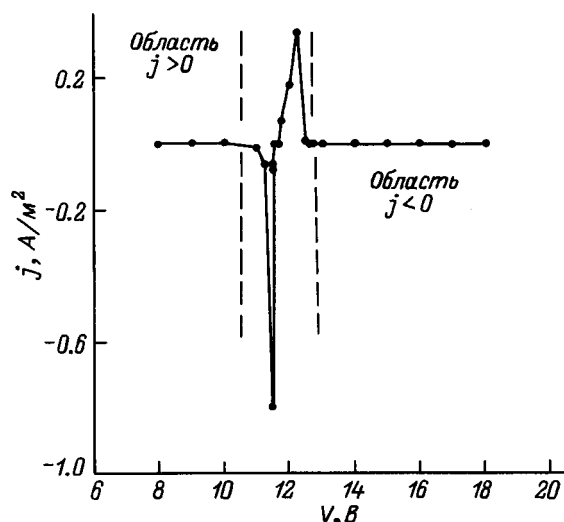


Рис. 4. Зависимость $j_k = f(V)$ в сечении среза сопла. $P_0 = 0.4$ МПа, $p_a = 0.1$ МПа, $T_0 = 3000$ К, $L_a = 1.0$ м, $n = 1.3$.

тельного заряда, реализуется при истечении в окружающее пространство "низкотемпературных" ("трудноионизируемых") сред и также условно может быть отнесена к группе "генераторных" (рис. 1, б; 2, б).

Наконец, третья, переходная, группа режимов обнаруживает неопределенность знака заряда, выносимого с потоком ПС из камеры. Распределения по длине сопла параметров течения, определяющих развитие в потоке зарядовых неустойчивостей и в целом локальные электрофизические свойства ПС, в рамках реализаций режимов этой группы носят неоднозначный характер, в полной мере отображающий в том числе и сложный механизм переключения (через развитие в потоке ярко выраженной зарядовой неустойчивости) в процессе истечения знака выносимого из камеры заряда на противоположный (рис. 3).

Иными словами, аналогично [5] обнаруживается, что в области смены знака токов выноса (см., например, $j = f(V)|T_0 = \text{const}$ на рис. 4, зависимость $j = f(T_0)|V = \text{const}$ аналогична) оцениваемые решениями электрофизические характеристики зарядовых неустойчивостей не только резко возрастают по абсолютной величине, но и становятся существенно неопределенными по направлению (можно сказать, что зарядовая неустойчивость в этих условиях носит "катастрофический" характер). Обнаруживаемая картина, таким образом, реально отвечает общему характеру проявлений неустойчивостей в распределении электрического заряда по объему [5], развивающихся в слабоионизированных газовых средах в связи с параметрической нестационарностью (обусловленной в данном конкретном случае истечением).

Полученные результаты, подтверждая выдвинутое в работе исходное предположение о возможностях выноса заряда из камер в связи с развитием в среде продуктов

сгорания при истечении зарядовых неустойчивостей, обосновывают, таким образом, их вклад в механизм ДЭ в целом (по крайней мере в числе прочих, традиционно учитываемых развиваемыми известными моделями).

Значимость вклада формируемых в среде ПС при истечении зарядовых неустойчивостей в механизм двигательной (т.е. обусловленной непосредственно функционированием двигателя) электризации подтверждается в том числе и сопоставлением общих особенностей обнаруживаемых экспериментальными наблюдениями проявлений ДЭ и ожидаемых с учетом результатов настоящей работы.

Отметив, что в целом известные экспериментальные исследования ДЭ весьма немногочисленны, следует все-таки признать, что наиболее обширные, комплексные по охвату учитываемых факторов и весьма надежные результаты в этой области получены к настоящему времени специалистами Казанской научной школы (школа В.Е. Алемасова и А.Ф. Дрегалина), частично представленных, например, работами [2,4,6]. Отметим их общие особенности.

В [4] представлены уникальные экспериментальные материалы исследований характеристик ДЭ, полученные при испытаниях работающих на различных топливных смесях ЖРД на специально оборудованном в этих целях стенде. Работой [4], в частности, установлено существование трех характерных режимов двигательной электризации. Это прежде всего режим, когда в результате выноса с потоком из камеры положительного заряда двигатель заряжается отрицательным электричеством. Этот режим свойствен прежде всего высокотемпературным режимам (определяемых сопоставимостью со стехиометрическим соотношением топливных компонентов в камере). Характеристики ДЭ в этих условиях являются устойчивыми. Двигатель в процессе работы приобретает и устойчиво сохраняет отрицательный по отношению к земле потенциал.

В области же низкотемпературных (генераторных) режимов, согласно [4], напротив, характерен вынос из камеры отрицательного заряда. Двигатель при этом заряжается положительным электричеством. Приобретает и устойчиво сохраняет положительный по отношению к земле потенциал.

Наконец, работой выявлено существование режима формирования неустойчивого потенциала, отвечающего области смены знака выносимого с потоком заряда (потенциала). При этом отмечается, что абсолютные уровни электрофизических характеристик ДЭ в этой области многократно возрастают по отношению к свойственным устойчивым режимам и, кроме того, оказываются неопределенными по направлению.

Отмечаемые общие особенности характеристик ДЭ обнаруживают, таким образом, полное качественное соответствие с материалами настоящей работы (рис. 1–4). Находятся в согласии с известными наблюдениями и более частные ее результаты.

В [6] указывается на расширение области неустойчивых режимов с повышением степени расширения среды

при истечении. Последнее подтверждается и материалами численных расчетов настоящей работы. Возможно упомянуть и о соответствии результатам наблюдений [2,3] изначально учитываемого в работе распределения выносимого заряда по сечению потока. Иными словами, сопоставлениями выявляется качественная аналогия между характерами ожидаемых проявлений ДЭ в предположении об определяющем вкладе в ее механизм зарядовых неустойчивостей, с одной стороны, и обобщениями результатов экспериментальных наблюдений, с другой.

Результаты в целом, таким образом, действительно свидетельствуют в пользу утверждения, что двигательная электризация как явление действительно отображает развитие неустойчивостей в распределении электрического заряда в объеме продуктов сгорания при истечении из камер ТРД.

Заключение

Теоретическими исследованиями в рамках трехжидкостной модели обоснована правомочность представлений о двигательной электризации ТРД как явления, отображающем в том числе и развитие неустойчивостей в распределении электрического заряда по объему продуктов сгорания при истечении из камер. Для уточнения значимости относительного вклада зарядовых неустойчивостей в механизм ДЭ и в целом углубления представлений о двигательной электризации в рамках формируемой модели необходимы, однако, дальнейшие теоретические и особенно экспериментальные исследования. Детальных исследований требует, в частности, механизм ограничений накапливаемого в связи с ДЭ заряда на корпусе ТРД в полетных условиях.

Автор хотел бы выразить признательность Г.Е.Скворцову, полезными обсуждениями и деловыми замечаниями оказавшему автору конкретную помощь в окончательной подготовке к печати рукописи настоящей работы.

Список литературы

- [1] *Aronowitz L.* // IEEE Trans. on Electromagn. Compability. Vol. EMC-10. 1968. N 4. P. 341–346.
- [2] *Потапов Г.П.* // Известия вузов, Авиационная техника. № 4. 1978. С. 112–117.
- [3] *Ватажин А.Б., Грабовский В.И., Лихтер В.А., Шульгин В.И.* Электрогазодинамические течения. М.: Наука, 1983. 315 с.
- [4] *Шкаликов В.А.* // Тепловые процессы и свойства рабочих тел двигателей летательных аппаратов / Под ред. В.Е.Алемасова. Казань: Каи, 1980. С. 41–47.
- [5] *Пинчук В.А.* // ИФЖ. 1994. Т. 67. № 1–2. С. 112–118.
- [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.