

**С.И. Коршаковский**

(Московский государственный технический университет радиотехники,  
электроники и автоматики; e-mail: korshakovsky.mirea@gmail.com)

## **ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ**

*Проведён анализ метода контроля газовой среды двигательной установки. Метод основан на формировании информационных сигналов зарядами, движущимися в газовой среде при деградации материала трубопровода. Проведены оценки параметров сигналов.*

*Ключевые слова: безопасность, методы контроля, газовый поток, жидкостный ракетный двигатель, сигнал датчика.*

**S.I. Korshakovsky**

## **ELECTROSTATIC METHOD FOR CONTROL OF GAS ENVIRONMENT OF MOTOR INSTALLATION OF LIQUID ROCKET ENGINE**

*The analysis method for control of gas environment of motor installation. The method is based on the formation of information signals charges moving in the gas environment in the degradation of the pipeline material. The estimation of signal parameters are held.*

*Key words: safety, methods of control, gas flow, liquid rocket engine, signals in the sensor.*

### **Введение. Постановка задачи**

Быстропеременные процессы в дисперсной среде проточной части **объединённой двигательной установки (ОДУ) жидкостного ракетного двигателя (ЖРД)** и магистралях в условиях повышенного нагрева, вибраций, высокого уровня электромагнитных полей могут привести к преждевременному износу материальной части трактов и частей двигательной установки. При нормальном режиме работы ОДУ во всех трактах устанавливается стационарный режим, характеризующийся равномерным распределением параметров по сечениям газопотока, в газогенераторе и т.д. Усредненные параметры газового потока в газопроводе при нормальных условиях работы характеризуются следующими значениями: давление  $p = 100 \text{ атм}$ , скорость потока  $v = 100 \text{ м/с}$ , температура  $t = 100\text{-}600 \text{ }^\circ\text{C}$ .

При нарушениях режима работы ОДУ, связанных, в частности, с местным прогаром, с истиранием плавающих колец, движущихся элементов турбины, насосов и других узлов, происходят изменения этих параметров, в первую очередь – температуры [1-4]. Кроме этого отмеченные нарушения изменяют состав газовой среды, который, в свою очередь, определяется как изменением состава смеси горючего, так и появлением продуктов абляции и истирания, в частности – частиц металла элементов тракта, с которыми контактирует газовый поток. Таким образом, газовая среда становится существенно дисперсной [5, 6].

При этом нарушение однородности газового потока приведет к изменению параметров течения в тракте и его физических свойств, по сравнению с нормальным режимом работы ОДУ. Контроль однородности потока с одновременным измерением его параметров позволит установить факт нарушения состояния ОДУ.

При использовании традиционных, а также при разработке новых методов неразрушающего контроля объектами диагностики должны быть *аварийноопасные* элементы, которые несут максимально возможную информацию о работоспособности ОДУ в целом. В условиях быстропеременных процессов, протекающих в магистралях ОДУ и в его сопле, для контроля состояния ЖРД необходимо использовать комплексные средства контроля, охватывающие широкий спектр контролируемых параметров, определяемых спецификой его работы и происходящих в магистралях и потоке газовой среды физических процессов.

В настоящее время для целей контроля применяются в основном методы диагностики, основанные на использовании традиционных датчиков давления, температуры и т.п. Объектами диагностики в двигателе являются газовая среда в магистралях и на выходе сопла и наиболее уязвимые теплонапряженные элементы конструкции двигательной установки. Однако применение традиционной аппаратуры затруднено для контроля быстропеременных процессов, особенно для контроля как газообразных, так и твёрдых движущихся сред.

### **Импульсы Тричела**

Для решения этих задач могут быть использованы широко известные электростатические методы диагностики [8-13]. Так, в [9] разработана система контроля в *газовоздушном тракте двигателя (ГТД)*. Измеряя с помощью специальных зондов электростатические сигналы в реактивной струе, появляющиеся при той или иной форме повреждений, можно обнаружить повышенный износ или разрушение ГТД. Для этого вначале исследуется интенсивность износа нормально работающего двигателя в зависимости от режима его работы и испытываемых им переменных циклов. Затем интенсивность нормализуется по этим двум параметрам. Десятикратное превышение нормализованной интенсивности износа можно принять в качестве признака назревающего отказа элементов двигателя.

Обычное число пакетов импульсов заряженных частиц в реактивной струе изменяется в зависимости от тяги двигателя  $G$  и наработки циклов  $N$ , а также от некоторых полётных факторов  $F$ . Предполагается, что основным полётным фактором для новых двигателей будет процесс приработки. В первых нескольких полётах будет иметь место повышенное истирание вследствие аэродинамических инерционных гироскопических нагрузок, а также первоначальная притирка уплотнений.

Практически необходимо исследовать число пакетов заряженных частиц как функцию тяги, количества переменных циклов и условий полёта в течение нескольких сот часов на кондиционном двигателе, а затем представить данные отсчета в виде дискретной функции:

$$\mathcal{M} = \frac{M}{\kappa_1 G + \kappa_2 N + \kappa_3 F}, \quad (1)$$

где  $\mathcal{M}$  – нормализованное количество импульсов;  
 $M$  – зарегистрированное количество импульсов;  
 $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$  – постоянные;  
функции  $G, N, F$  и постоянные определяются эмпирически в различных условиях эксплуатации.

Опыт показал, что с помощью разработанного метода можно прогнозировать повреждения проточной части ГТД примерно в двух случаях из трёх с опережением на несколько часов [9]. Обнаружено, что возникновению некоторых повреждений проточной части ГТД предшествовало повышение электрической активности реактивной струи, хотя определённой физической связи между наличием пакетов частиц и повреждением в двигателе обнаружено не было.

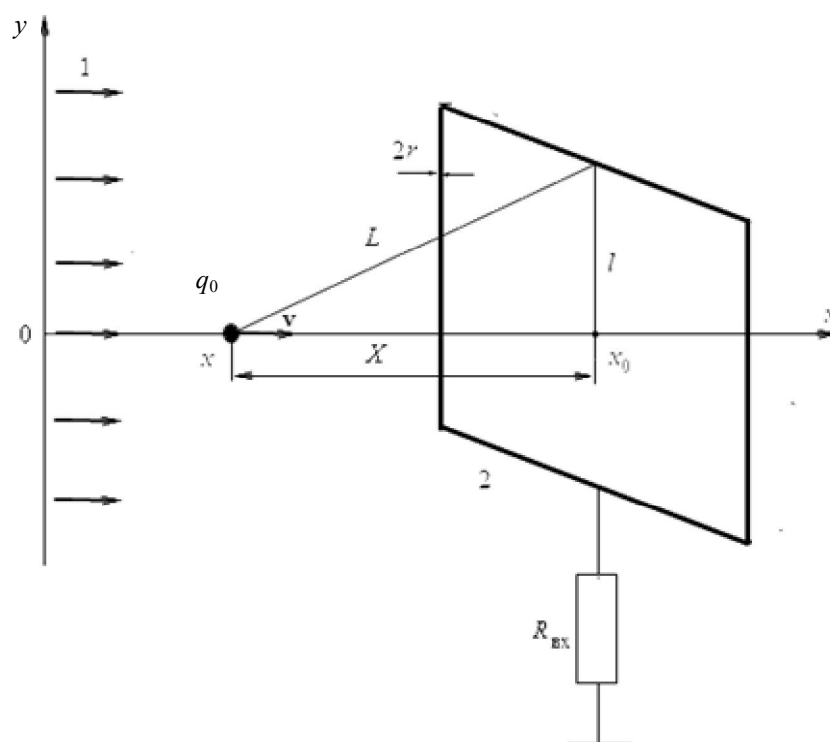
Установлено, что такие электрические сигналы представляют собой импульсы Тричела (разновидность повторяющегося коронного разряда от пакетов сильно заряженных частиц). Было также установлено, что электрические сигналы возникают, когда с поверхности внутренних элементов двигателя в результате их истирания или прогара отрываются группы из большого числа металлических частиц размером 5-100 мкм, образуя пакеты интенсивно заряженных частиц [6-8]. Число и размер этих пакетов изменялись в ходе работы двигателя в соответствии с ожидаемой степенью износа его проточной части.

Разработанный метод нормализации сигналов, основанный на использовании среднего уровня постоянного тока в реактивной струе и скорости изменения квадрата частоты вращения, содержит 10-канальную цифровую систему прогнозирования [11, 12]. Увеличение выходного сигнала в любом из каналов указывает на повреждение какого-либо элемента проточной части двигателя или назревающий отказ.

Рассмотренный метод позволяет не только осуществить контроль состояния ЖРД, но и даёт возможность прогнозирования отказов в элементах ОДУ. Однако результаты использования предложенной технологии контроля на реальных изделиях, по данным литературных источников, автору неизвестны. Для увеличения эффективности и надёжности метода необходимо провести цикл исследований, связанных с формированием электростатических сигналов, определением границ его применимости, определения чувствительности датчика и др.

## Физические основы метода

Пусть имеется датчик, выполненный в виде электропроводной рамки в форме квадрата со стороной  $2l$ , изготовленной из проволоки радиусом  $r$ , а частица с зарядом  $q_0$  движется вдоль оси квадрата со скоростью  $v$  (рис. 1). Рамка электрически соединена с землёй (корпусом изделия) через сопротивление  $R_{вх}$ , равное входному сопротивлению регистрирующего прибора, и установлена в сопле двигателя перпендикулярно потоку. Выбранная форма обеспечивает приемлемое осреднение параметров потока и упрощает задачу. Определим наведённый (индуцированный) заряд  $q$  в рамке.



**Рис. 1.** Электропроводный контур в потоке заряженных частиц:  
 1 – набегающий поток в тракте двигательной установки;  
 2 – электропроводная рамка

Воспользуемся теоремой взаимности Грина [16] для произвольной системы заряженных тел

$$\sum_i q_i \varphi'_i = \sum_i q'_i \varphi_i,$$

где  $\varphi_i$  – потенциалы тел, входящих в систему, когда они имеют заряды  $q_i$ ;  
 $\varphi'_i$  – потенциалы для случая, когда заряды тел имеют величины  $q'_i$ .

Для системы "заряженная частица – рамка" можно записать:

$$q\varphi' + q_0\varphi'_0 = q'\varphi + q'_0\varphi_0, \quad (2)$$

где величины без индекса относятся к рамке, индекс "0" – заряженная частица, величины без штрихов относятся к данной измерительной системе (заряженная

частица вблизи заземлённой рамки), а величины со штрихом относятся к ситуации, когда рамка не заземлена (на ней заряд  $q'$ , а заряд частицы  $q'_0 = 0$ ).

Считая потенциал земли  $\varphi = 0$ , индуцированный в рамке заряд определится как

$$q = -q_0 \frac{\varphi'_0}{\varphi'} . \quad (3)$$

Задача, таким образом, сведена к вычислению потенциалов  $\varphi'_0$  и  $\varphi'$ .

Считая распределение зарядов в рамке равномерным с линейной плотностью  $\tau$ , используя принцип суперпозиции и очевидное неравенство  $l \gg r$ , получены следующие выражения для неизвестных потенциалов:

$$\varphi'_0 = \frac{\tau}{\pi\epsilon_0} \ln \frac{\sqrt{3l^2 + v^2t^2} + l}{\sqrt{3l^2 + v^2t^2} - l}, \quad \varphi' = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2l}{r} . \quad (4)$$

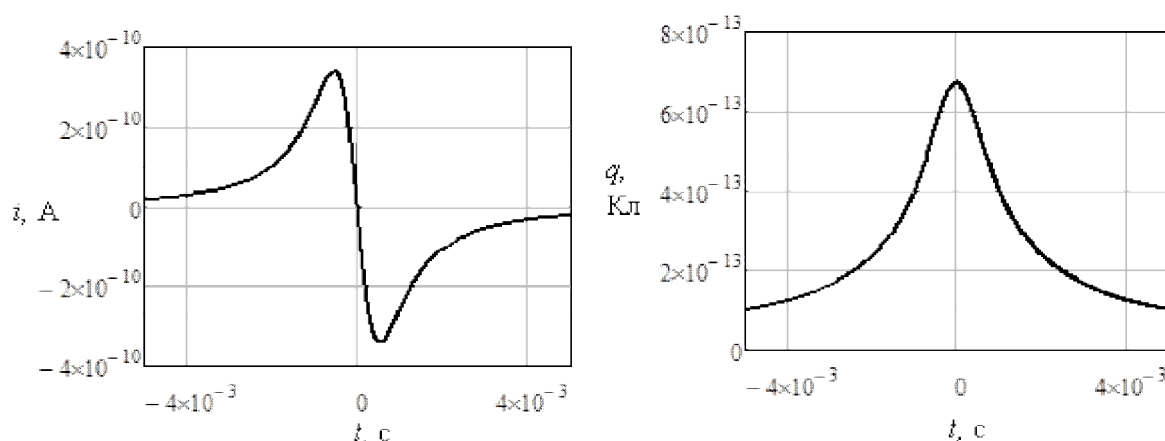
При выводе формул использовались геометрические параметры, показанные на рис. 1, где  $X = x_0 - x = vt$ , а потенциал рамки  $\varphi'$  считался равным потенциалу на поверхности одной из её сторон в её середине. Используя эти соотношения, окончательно получим:

$$q = -q_0 \frac{2}{\ln \frac{2l}{r}} \ln \frac{\sqrt{3l^2 + v^2t^2} + l}{\sqrt{3l^2 + v^2t^2} - l} . \quad (5)$$

Величина наведённого в рамке тока проводимости определится как

$$i = \frac{dq}{dt} = - \frac{2q_0v^2t}{\ln(2l/r)\sqrt{3l^2 + v^2t^2}} \left( \frac{1}{1 + \sqrt{3l^2 + v^2t^2}} + \frac{1}{1 - \sqrt{3l^2 + v^2t^2}} \right) . \quad (6)$$

Типичные зависимости наведённого заряда и тока в рамке, рассчитанные с помощью этих выражений, показаны на рис. 2.



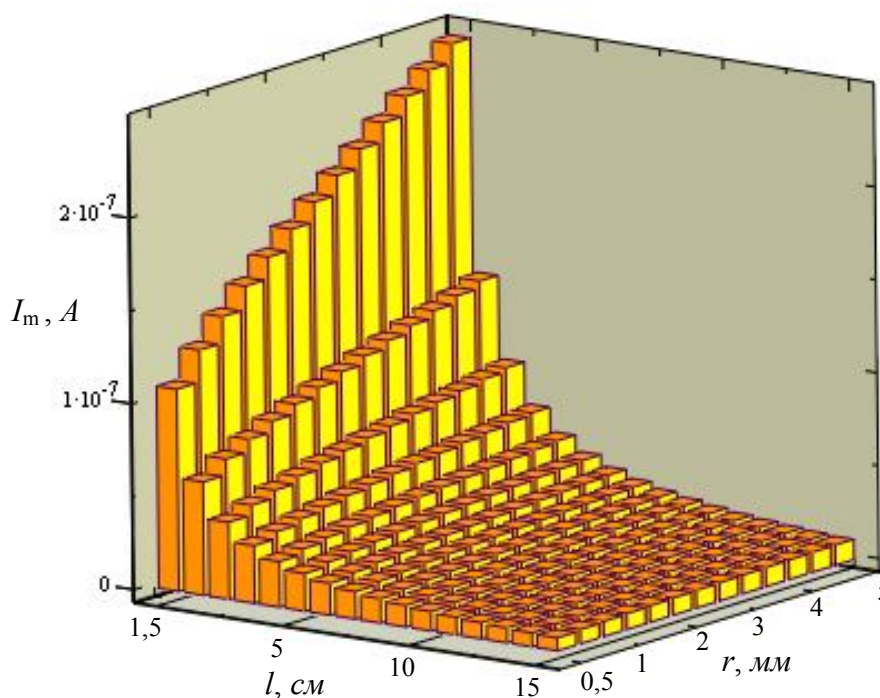
**Рис. 2.** Типичный характер наведённого заряда и тока в электропроводной рамке при осесимметричном движении заряженной частицы:

$$q_0 = -10^{-12} \text{ Кл}; \quad v = 100 \text{ м/с}; \quad l = 5 \text{ см}; \quad r = 2 \text{ мм}$$

### Предельные возможности метода

Основными параметрами сигнала датчика, как видно из анализа (6) и рис. 2, являются его амплитуда  $I_m$  и характерная длительность импульса  $\tau$ , равная разности моментов времени, когда функция  $i(t)$  принимает экстремальные значения. Величина  $\tau$ , собственно, характеризует разрешающую способность метода, так как является определяющим фактором при формировании пакета импульсов заряженных частиц (см. ниже). В то же время чувствительность датчика определяется, минимальным зарядом частицы  $|q_{\min}|$ , фиксируемым данным устройством с соответствующей амплитудой тока  $I_m$ . Все эти параметры зависят от геометрических размеров рамки и скорости движения заряда.

На рис. 3 в форме столбчатой диаграммы показана зависимость амплитуды тока  $I_m$  от геометрических параметров датчика  $l$  и  $r$ . Видно, что с увеличением толщины проволоки величина тока возрастает, а увеличение размера рамки приводит к его уменьшению. В то же время увеличение скорости заряда  $v$  приводит к практически линейному увеличению  $I_m$ .

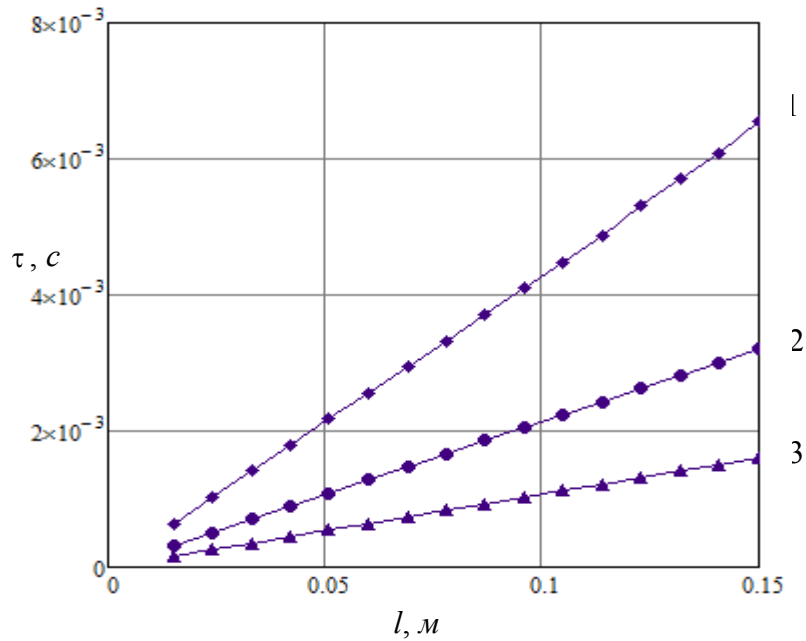


**Рис. 3.** Зависимость амплитуды наведённого тока в рамке от её геометрических параметров:

$$q_0 = -10^{-12} \text{ Кл}; v = 100 \text{ м/с}$$

На рис. 4 показано изменение характерной длительности  $\tau$  от размера рамки  $l$  и скорости  $v$ , при этом толщина проволоки и заряд частицы не влияют на величину  $\tau$ .





**Рис. 4.** Зависимость характерной длительности импульса  $\tau$  от размеров рамки  $l$ :  
 1 –  $v=50$  м/с; 2 –  $v=100$  м/с; 3 –  $v=200$  м/с

Проведём оценку границы применимости метода, зависящую от возможного уровня помех в элементах устройства, через величину  $|q_{\min}|$ , используя классическое представление шумового напряжения входной цепи устройства [14]:

$$\sqrt{U_{\text{ш}}^2} = \sqrt{4kTR_{\text{вх}}\Delta f}, \quad (7)$$

где  $k = 1,38 \times 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана;  
 $T$  – абсолютная температура;  
 $\Delta f$  – полоса пропускания частот входного устройства.

Полагая далее  $T = 300$  К,  $R_{\text{вх}} = 10^6$  Ом,  $\Delta f = 1/\tau$ , где при  $q_0 = -10^{-10}$  Кл,  $l = 5$  см и  $v = 100$  м/с  $\tau = 10^{-3}$  с (рис. 2 и 4), оценка искомой величины даёт среднестатистическое напряжение шумов  $\sqrt{U_{\text{ш}}^2} \approx 4 \times 10^{-6}$  В. Считая 10-кратное превышение входного напряжения над шумовой составляющей достаточно приемлемым для надёжной работы входного устройства, амплитуда тока при этом составит  $\sim 40 \times 10^{-12}$  А.

Далее следует оценить предельную величину заряда  $|q_{\min}|$ , используя максимальную величину напряжённости пробоя воздуха  $E_{\text{max}} = 3 \times 10^6$  В при нормальных условиях и принятых параметрах устройства:

$$E = \frac{|q_{\min}|}{4\pi\epsilon_0\epsilon R^2} = E_{\text{max}}. \quad (8)$$

Тогда с учётом  $\epsilon \approx 1$

$$|q_{\min}| = \pi\epsilon_0 d^2 E_{\text{max}}. \quad (9)$$

Здесь  $R$  и  $d$  – радиус и диаметр частиц, образовавшихся в результате рассмотренных выше нарушений в трактах двигательной установки. Результаты расчёта сведены в табл. 1.

Таблица 1

**Ожидаемые величины зарядов частиц при нарушениях  
в магистралях тракта ОДУ**

$d, \text{ мкм}$	5	100	500
$ q_{\min} , \text{ Кл}$	$2 \times 10^{-15}$	$8 \times 10^{-13}$	$2 \times 10^{-11}$

Оценка величины предельного заряда даёт возможность оценить минимальный диаметр частиц  $d_{\min}$ , заряд которой можно определить, используя принятые выше условия и выражение (9). С этой целью для амплитуды полученного предельного значения тока  $40 \times 10^{-12} \text{ А}$  найдём величину  $|q_{\min}|$ , используя линейные соотношения между  $q_0$  и  $I_m$ . По результатам этой оценки  $|q_{\min}| \approx 36,7 \times 10^{-15} \text{ Кл}$ , а диаметр частиц, фиксируемых устройством при выбранных геометрических параметрах, составляет  $\geq 21 \text{ мкм}$ .

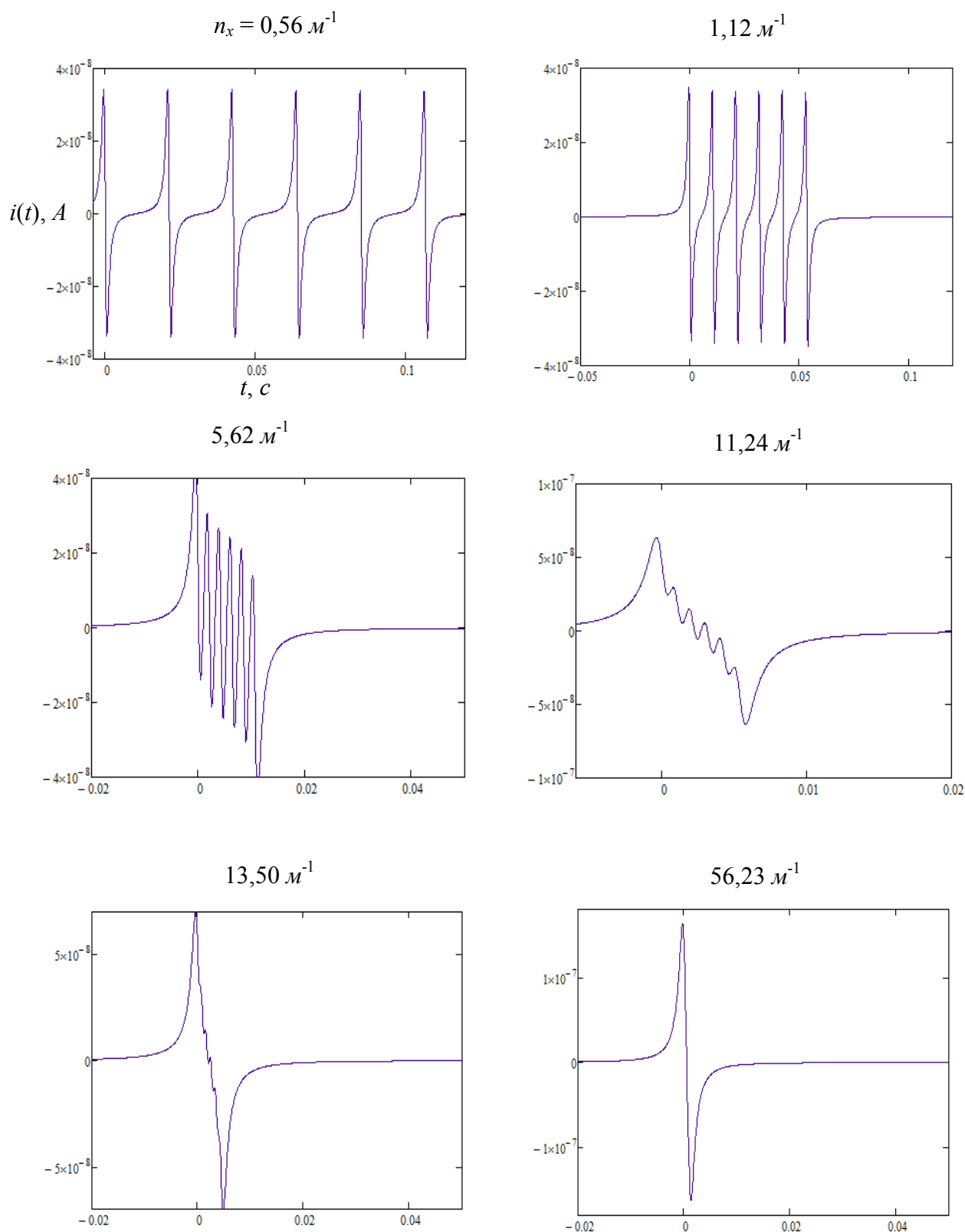
**Формирование пакета импульсов. Основные выводы**

Электростатический импульс, сформированный отдельным зарядом, даёт возможность провести ряд важных исследований и оценок физических параметров устройства. Однако для проведения качественной диагностики и контроля магистралей ОДУ необходимо рассмотреть поток частиц, образовавшихся в результате различных нарушений в этих трактах. С этой целью целесообразно для простоты представить равномерное распределение по оси рамки непрерывно следующих друг за другом зарядов с линейной плотностью  $n_x$ . Серия из 6 таких одиночных импульсов с заданными  $n_x$  представлена на рис. 5. Видно, что при увеличении плотности зарядов пакет импульсов "сжимается" во времени, в пределе – до значения  $\tau$ , характерного для одиночного импульса (см. выше). В то же время при  $n_x = 13,5 \text{ 1/м}$  ещё наблюдаются отдельные импульсы, из которых состоит этот пакет, что и определяет разрешающую способность метода.

Дальнейшее суммирование импульсов (увеличение линейной плотности заряженных частиц  $n_x$ ) приводит к наложению их друг на друга, увеличению результирующей амплитуды сформированного таким образом пакета импульсов  $I_{\text{mm}}$ , уменьшению при этом характерного суммарного времени  $\tau_{\Sigma}$ . Этот процесс наглядно представлен на рис. 6.

Рассмотренная система, в основу которой положен электростатический метод регистрации импульсных электростатических сигналов в выхлопной струе датчиками, установленными в сопле, может выполнять следующие функции: контроль износа элементов проточной части двигателя, контроль состояния ГТД, функции средств диагностики для выявления узла двигателя с повышенной интенсивностью износа.

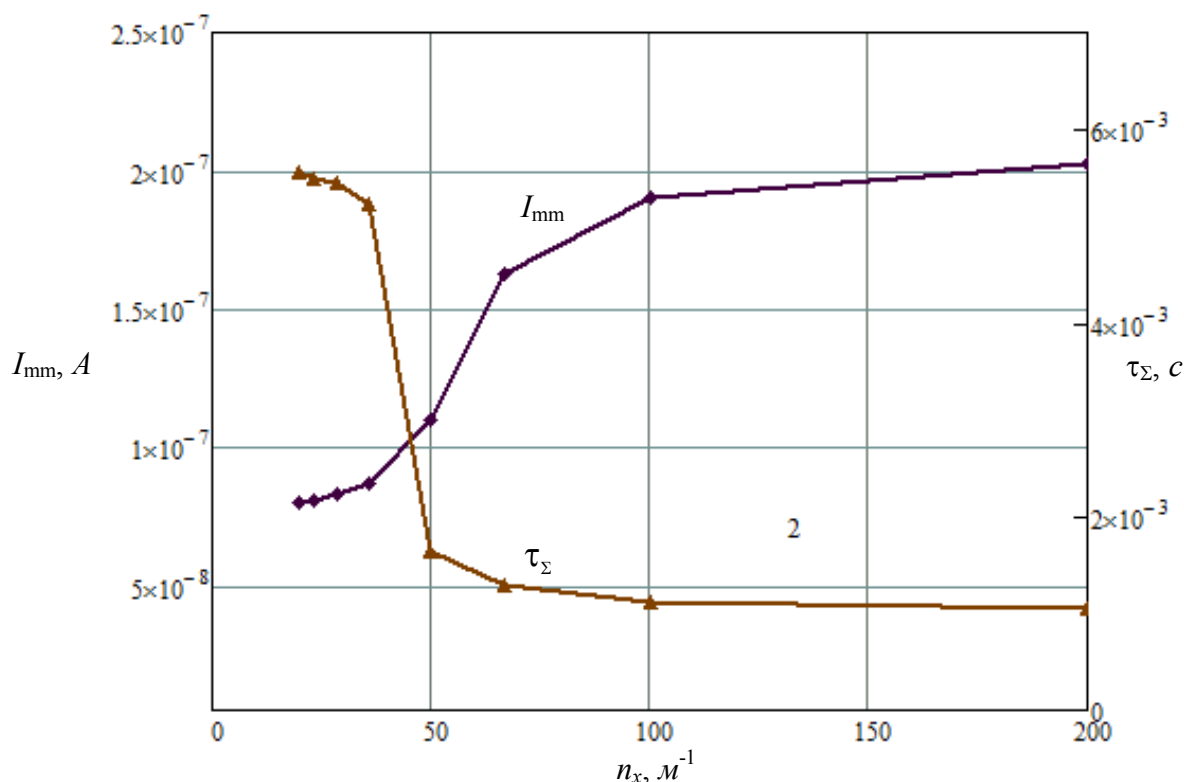




**Рис. 5.** Формирование сигналов тока в датчике при движении равномерно распределённых зарядов вдоль оси с линейной концентрацией  $n_x$ :  
 $q_0 = -10^{-10} \text{ Кл}$ ;  $v = 100 \text{ м/с}$ ;  $l = 5 \text{ см}$ ;  $r = 2 \text{ мм}$

Результаты проведенных исследований позволили провести необходимые оценки точности, разрешающей способности метода, оценить предельные величины заряда частиц в результате отрыва их с поверхности внутренних элементов двигателя в результате их истирания или прогара. Образовавшиеся пакеты импульсов позволяют фиксировать присутствие металлических частиц размерами менее 20 мкм – от 5 и более.

Разработка системы контроля и аварийной защиты изделия на основе рассмотренной методики, несомненно, является актуальной задачей при решении вопросов технической безопасности объекта.



**Рис. 6.** Изменения амплитуды тока  $I_{mm}$  и длительности пакетов импульсов заряженных частиц  $\tau_{\Sigma}$  от линейной концентрации зарядов  $n_x$ :

$$q_0 = -10^{-10} \text{ Кл}; \quad v = 100 \text{ м/с}; \quad l = 5 \text{ см}; \quad r = 2 \text{ мм}$$

### Литература

1. **Методика** определения стойкости газовых трактов к воздействию металлических частиц. М.: Изд. НИИТП, 1989.
2. **Лозино-Лозинская И.Г., Осколков Н.В., Кистэ Н.В.** Экспериментальные исследования по обеспечению работоспособности конструкции в потоке высокотемпературного газогенераторного газа. М.: Изд-во. ФГУП "Центр Келдыша", 1996.
3. **Труды** НПО Энергомаш им. В.П. Глушко / Мовчан Ю.В., Лозино-Лозинская И.Г., Полушин В.П., Семёнов В.Н. М., 2006. 18 с.
4. **Рабочие** процессы в жидкостном ракетном двигателе и их моделирование / под ред. Коротеева А.С. М.: Машиностроение, 2008.

5. **Dechaux T.C., Delfosse L.** Combust. Flame, 34, No. 2, 1979. Pp.161-168, 169-186.
6. **Sajben M., Peng T.C., Schaeffer J.F.** Evaluation of experiments using electrostatic probes to detect imminent failure of jet-engine gas path components. Air Force Flight Dynamics Lab., Wright-Patterson AFB, Ohio. AFFDL-TR-75-74, July, 1975.
7. **Mitchell J.E.** Exploding wire simulation of jet engine gas-path microdistresses. Air Force Institute of Technology. Wright-Patterson AFB, Ohio, Thesis GNE/PH/75-20, Dec., 1975.
8. **Arlen R.D.** An investigation of laser-target interaction signals. Air Force Institute of Technology, Wright-Patterson AFB, Ohio, Thesis GNE/RH/75-4, Dec., 1975 (available DDC, AD-AO39161).
9. **Couch R.P.** Обнаружение повышенного износа и разрушений ГТД электростатическим методом. J. of Aircraft, X, Vol. 15, No. 10, 1978. Pp. 692-695.
10. **Неразрушающий** контроль // Справочник под общ. ред. Клюева В.В., том 1-8. М.: Машиностроение, 2006.
11. **Dunn R.W.** The electrostatic sensing of simulated MA-IA gas-path distress. Air Force Institute of Technology, Wright-Patterson AFB, Ohio, Thesis GNE/RH/75-2, Dec., 1976 (available DDC, AD-AO3952).
12. **Gifford W.E.** A method for analysis of electrostatic probe signals relating to jet-engine microdistresses. Air Force Institute of Technology, Wright-Patterson AFB, Ohio, Thesis GNE/RH/76-3, Dec., 1976 (available DDC, AD-AO38528).
13. **Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.** Электродинамика сплошных сред. М.: Физматгиз, 1985.
14. **Радиоприёмные** устройства / под ред. Фомина Н.Н. М.: Радио и связь, 2003.

Статья опубликована 29 декабря 2012 г.