

УДК 621.9.047

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ УПЛОТНЕНИЙ ГАЗОВОЗДУШНОГО ТРАКТА

В. П. Житников<sup>1</sup>, Н. И. Житникова<sup>2</sup>, С. С. ПОРЕЧНЫЙ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>zhitik@mail.ru, <sup>2</sup>zhitnikova\_ni@mail.ru, <sup>3</sup>porechny@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

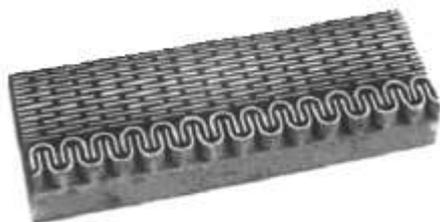
Поступила в редакцию 23.12.2016

**Аннотация.** Рассмотрена задача моделирования щеточных уплотнений газозвдушного тракта с помощью импульсной электрохимической обработки. Для экспериментальных исследований использовалась технологическая схема с применением трубчатого электрод-инструмента. Решена нестационарная задача формообразования при обработке плоским электрод-инструментом с щелью, при этом зависимость выхода по току от плотности тока принималась в виде дробно-линейной функции. Решение задачи получено с помощью формулы Шварца.

**Ключевые слова:** импульсная электрохимическая обработка, нестационарное формообразование, уплотнения газозвдушного тракта, переменный выход по току.

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из путей повышения газодинамической эффективности газотурбинных двигателей является совершенствование конструкций щеточных уплотнений газозвдушного тракта, позволяющих сократить утечки рабочей среды между разделяемыми полостями. Конструктивно уплотнения состоят из кругового массива большого количества (порядка  $10^2$ – $10^5$ ) близкорасположенных малоразмерных (с характерными размерами и шагом расположения порядка 0,1–1 мм) уплотнительных элементов – щетинок, сот, пластинок, зубцов, пальчиков (рис. 1).



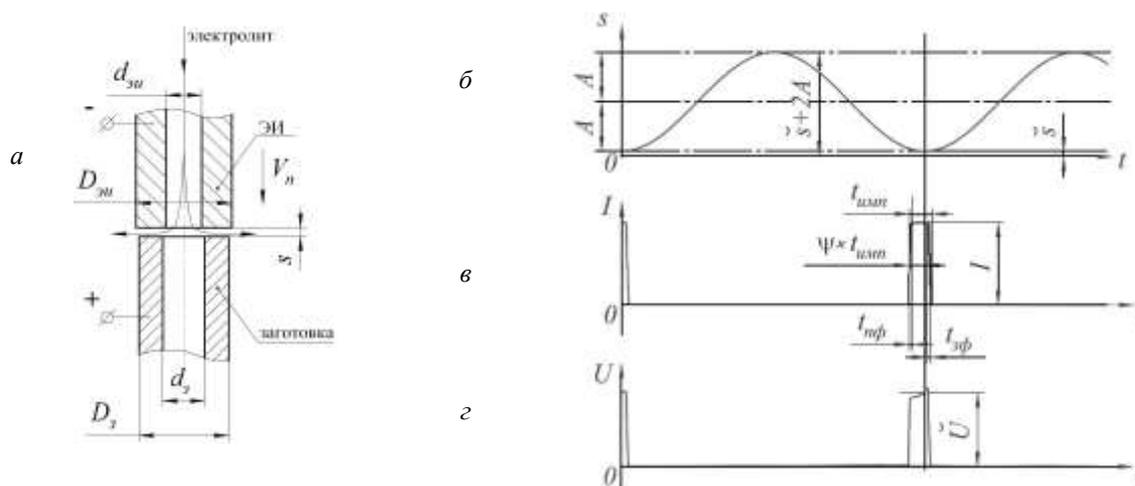
**Рис. 1.** Опытный образец некоторых видов уплотнений, изготовленный методом импульсной электрохимической обработки

Перспективные уплотнения новых конструкций должны иметь сложную продольную и поперечную форму уплотнительных элементов для обеспечения повышенных упругих, герметизирующих и других свойств. Традиционно используемые методы (навивка проволоки на оправку с последующей фиксацией, разрезкой и сваркой – для щеточных уплотнений; фотохимическая, электроэрозионная или лазерная обработка – для пальчиковых; пайка гофрированных лент – для сотовых и т.д.) имеют существенные технологические ограничения в плане удовлетворения указанных конструкторских идей, приводят к появлению поверхностного термически измененного слоя и заусенцев, требующих последующего удаления, не всегда обеспечивающих требуемую точность или экологически не безопасны.

Для размерного формообразования уплотнительных элементов перспективных уплотнений наиболее рациональным на наш взгляд решением является применение импульсной электрохимической обработки (ЭХО) [1]. Для реализации указанного способа изготовления необходимо иметь электрод-инструмент (ЭИ) в виде тонкой неизолированной перфорированной пластины с отверстиями различных форм и размеров [2–4].

Следует отметить, что формализованное описание технологической схемы данным ЭИ недостаточно освещено в научно-технической

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках базовой части госзадания образовательным организациям высшего образования.



**Рис. 2.** Технологическая схема (а) и осциллограммы колебательного движения ЭИ (б), подачи импульсов тока (в) и напряжения (з)

литературе. Это не позволяет в полной мере использовать технологические преимущества метода импульсной ЭХО при изготовлении перспективных уплотнений.

В этой связи актуальным является разработка достаточно простых, но эффективных математических моделей процесса электрохимического размерного формообразования, которые могут использоваться в промышленных условиях на машиностроительных предприятиях.

### 1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭХО

В известных работах по моделированию ЭХО (например [5–8]) решаются задачи различной сложности, учитывающие разные факторы, влияющие на процесс обработки.

Будем считать электрическое поле в межэлектродном пространстве (МЭП) соленоидальным и потенциальным. При этом

$$\text{rot } E = 0, \quad E = \text{grad } \Phi,$$

где  $E$  и  $\Phi$  – напряженность и потенциал электрического поля соответственно.

В отсутствии распределенных источников тока

$$\text{div } j = \text{div } \kappa E = 0, \quad \text{div } \kappa \text{ grad } \Phi = 0,$$

где  $j$  – плотность тока,  $\kappa$  – удельная электропроводность межэлектродной среды.

Часто считается, что  $\kappa$  изменяется по пространству достаточно медленно, тогда ее можно вынести за знак дивергенции. В этом случае потенциал электрического поля удовлетворяет уравнению Лапласа  $\Delta \Phi = 0$ . Плотность тока при этом находится после определения напряженности электрического поля в соответствии с законом Ома  $j = \kappa \text{ grad } \Phi$ .

Использование уравнения Лапласа дает возможность применения методов теории функций комплексного переменного (ТФКП). Это позволяет получить в ряде случаев точные (аналитические) решения, а в более сложных случаях использовать эффективные численные методы [7].

Для задач ЭХО границы, как правило, бывают двух типов: непроницаемые (поверхности изолированных частей электродов) и рабочие поверхности электродов. На непроницаемых границах нормальная составляющая напряженности

$$E_n = \partial \Phi / \partial n = 0.$$

На границах, соответствующих поверхности электродов, величина потенциала

$$\Phi_a = 0 + \varphi_a, \quad \Phi_c = -U + \varphi_c,$$

где  $U$  – напряжение на электродах,  $\varphi_a$  и  $\varphi_c$  – анодный и катодный потенциалы соответственно.

Для ЭХО на импульсном токе в качестве основного расчетного соотношения используется закон Фарадея

$$\frac{dh}{dt} = \eta(j_n) k_l \frac{\alpha_m}{\rho \kappa} j_n = \eta(j_n) \frac{k}{\rho \kappa} j_n, \quad k = k_l \alpha_m, \quad (1)$$

где  $h$  – толщина растворенного металла,  $t$  – время,  $\eta$  – анодный выход по току,  $\alpha_m$  – массовый электрохимический эквивалент растворяемого металла,  $j$  – плотность тока,  $k_l$  – величина, обратная скважности импульсов,  $\rho$  – плотность материала заготовки,  $j_n$  – нормальная составляющая плотности тока (при эквипотенциальном аноде  $j_n = |j|$ ).

## 2. НАХОЖДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ВЕЛИЧИН

Для исследования процесса импульсной ЭХО вибрирующим ЭИ выбрана технологическая схема «трубка в трубку» (см. рис. 2, а), заключающаяся в использовании трубчатого ЭИ, подключенного к отрицательному полюсу источника технологического тока (ИТТ), и трубчатой заготовки, подключенной к положительному полюсу ИТТ. При этом внешний диаметр ЭИ  $D_{эи}$  несколько превышает внешний диаметр заготовки  $D_{заг}$ , а внутренний диаметр ЭИ  $d_{эи}$  меньше внутреннего диаметра заготовки  $d_{заг}$ , что позволяет избежать образования боковой поверхности на заготовке. Подача электролита в МЭП под давлением  $p_{эл}$  осуществляется через центральное отверстие в ЭИ.

В процессе обработки ЭИ сообщается движение подачи в направлении заготовки со скоростью  $V_n$  и возвратно-поступательное колебательное движение по гармоническому закону (см. рис. 2, а, б). Импульсы тока длительностью  $t_{имп}$  с амплитудным значением  $I$  подаются с частотой  $f$ , равной частоте колебательного движения ЭИ, в момент, предшествующий нижнему положению ЭИ на величину  $\psi t_{имп}$ . Таким образом, доля импульса, прошедшая до момента максимального сближения электродов, характеризуется параметром, называемым фазой подачи импульса  $\psi$  (см. рис. 2, в).

Заданное оператором станка напряжение  $U_0$  алгоритмически обеспечивается в момент наибольшего сближения электродов путем корректирования значения тока в импульсе

$$I^{(m)} = I^{(m-1)} \cdot \frac{U_0}{\tilde{U}^{(m-1)}}, \quad (2)$$

где  $m$  – номер импульса,  $\tilde{U}$  – фактическое напряжение в нижнем положении ЭИ (с дугой будем обозначать параметры, соответствующие моменту достижения нижнего положения ЭИ в каждом периоде его колебательного движения) (рис. 2, з).

Обработка осуществлялась в среде 8% водного раствора  $\text{NaNO}_3$  при температуре 23 °С. Удельная электропроводность чистого электролита  $\chi_0 = 8,48 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$  [7]. Размеры электродов были следующие:  $D_{эи} = 16 \text{ мм}$ ,  $D_{заг} = 15^{+0,05} \text{ мм}$ ,

$d_{эи} = 6 \text{ мм}$ ,  $d_{заг} = 7_{-0,05} \text{ мм}$ . Таким образом, площадь обрабатываемой поверхности трубчатой заготовки  $P_{заг} = (1,38 \pm 0,01) \text{ см}^2$ .

Так как электрохимический эквивалент  $\alpha_m$  и анодный выход по току  $\eta$  являются в общем случае функциями плотности тока, то является методически целесообразным для практики использовать функцию

$$\eta(j) = \frac{m_{np}}{m_{теор}} = \frac{P_{заг} V_n \kappa}{\alpha_m k_I I} \quad (3)$$

где  $m_{np}$ ,  $m_{теор}$  – практическая и теоретическая растворенные массы металла;  $j = I / P_{заг}$  – амплитудная плотность тока.

Эксперименты проводились на сталях двух марок: 12Х18Н9Т и 10Х11Н23ТЗМР (ЭП33). Обработку осуществляли до достижения установившегося режима, который определялся по стабилизации значений подаваемых импульсов тока.

Экспериментальные данные и аппроксимационная зависимость обезразмеренного практического удельного съема от амплитудной плотности тока для импульсной ЭХО стали 12Х18Н9Т приведены на рис. 3. Отметим, что качественно данная зависимость совпадает с экспериментальными результатами, приведенными в [9, 10]. В данной работе экспериментальная зависимость выхода по току от напряженности аппроксимировалась дробно-линейной функцией (рис. 3)

$$\eta(j) = \begin{cases} 0, & j \leq \beta, \\ \eta_0 \frac{j - \beta}{j - \gamma}, & j > \beta. \end{cases}$$

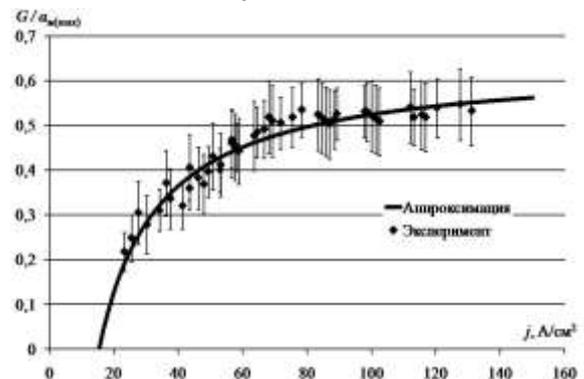
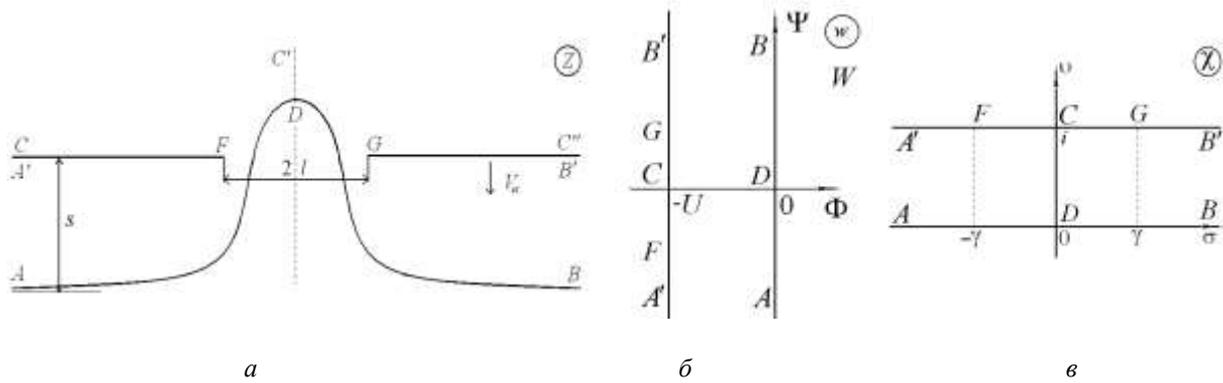


Рис. 3. Экспериментальная зависимость  $\eta(j) = G/\alpha_{m(\max)}$  для стали 12Х18Н9Т

Ранее при решении задач ЭХО принималось, что зависимость выхода по току от плотности тока либо постоянна, либо она



**Рис. 4.** Форма образа МЭП: *a* – на физической плоскости; *б* – на плоскости комплексного потенциала; *в* – на параметрической плоскости  $\chi$

аппроксимировалась гиперболой [6, 11], либо дробно-квадратичной функцией [6].

Однако оказалось, что параметр  $\gamma$  сравнительно мал, и аппроксимация гиперболой имеет практически такую же погрешность. Использование гиперболы позволяет свести задачу исследования различных режимов обработки к расчетам форм при изменении всего лишь одного параметра  $\alpha = j_1/j_0$ , где  $j_0$  – максимальное значение плотности тока на аноде.

### 3. ПОСТАНОВКА ПЛОСКИХ ЗАДАЧ

Рассмотрим задачу ЭХО, схема которой (в сечении) изображена на рис. 4, *a*. Плоский ЭИ  $A'FCGB'$  со щелью  $FG$  движется вертикально вниз со скоростью  $V_{et}$ . При течении времени поверхность анода  $AB$  изменяется за счет электрохимического растворения согласно закону Фарадея (1). Поверхности ЭИ и обрабатываемой детали считаются эквипотенциальными (потенциал детали равен нулю, потенциал ЭИ равен  $-U$ ).

Таким образом, для данной задачи при эквипотенциальных электродах область, соответствующая МЭП, на плоскости комплексного потенциала  $W = \Phi + i\Psi$  ( $\Phi$  – потенциал,  $\Psi$  – функция тока) имеет форму вертикальной полосы ширины  $U$  (рис. 4, *б*).

Известны решения подобных задач, полученные на основе методов конечных разностей и конечных элементов, граничных элементов [11]. Однако разработанные ранее методы не обладают достаточной устойчивостью к накоплению погрешности при расчете длительных переходных процессов.

Отобразим конформно области, соответствующие МЭП на плоскостях  $Z$  и  $W$ , на полосу  $\chi$  (рис. 4, *в*). Тогда задачу определения функции  $W(Z)$ , аналитической на области МЭП и удовлетворяющей условию эквипотенциальности анода и катода, можно решать в параметрическом виде. Необходимо найти две аналитические

внутри полосы  $0 < \text{Im}\chi < 1$  функции  $W(\chi)$  и  $Z(\chi, t)$ , удовлетворяющие определенным краевым условиям. Функция  $W(\chi)$  осуществляет конформное отображение полосы на полосу (и не зависит от времени).

Краевым условием для определения функции  $Z(\chi, t)$  является равенство известной при каждом фиксированном  $t$  функции  $f(\sigma, t)$  мнимой (или действительной) части  $Z(\chi, t)$  на границе  $\chi = \sigma$  ( $-\infty < \sigma < \infty$ ). При решении задачи  $f(\sigma, 0)$  определяется начальной формой МЭП (для данной задачи  $f(\sigma, 0) = 0$ ). Значения  $f(\sigma, t)$  при  $t > 0$  определяются с помощью условия типа уравнения Полубариновой-Галина [7], которое является следствием закона Фарадея (1)

$$\text{Im} \left( \frac{\partial Z}{\partial t} \frac{\partial Z}{\partial \sigma} \right) = -k\eta(\sigma) \frac{\partial \Psi}{\partial \sigma}. \quad (4)$$

Производную  $\partial Z / \partial t(\zeta, t)$  будем искать в классе аналитических функций. Тогда равенство (4) служит краевым условием на части границы, соответствующей поверхности анода. На участках границы, соответствующих ЭИ, растворения не происходит, поэтому в точках этих границ правая часть (4) равна нулю (в системе координат связанной с ЭИ).

### 4. НЕСТАЦИОНАРНАЯ ОБРАБОТКА ПЛОСКИМ ЭИ СО ЩЕЛЬЮ

Рассмотрим плоскую нестационарную задачу электрохимического растворения с помощью ЭИ, представляющего собой фольгу со щелью ширины  $2L$  (рис. 4, *a*).

Асимптотическая величина зазора на бесконечности влево  $S$  изменяется и приближается к стационарной величине

$$S_{st} = \frac{kU}{V_{et}} \eta \left( \frac{U}{S_{st}} \right) = \frac{kU\eta_0}{V_{et}} (1 - \alpha),$$

$$\alpha = \frac{E_1 S_{st}}{U}, \quad E_1 = \frac{j_1}{\kappa}. \quad (5)$$

Задачи удобнее решать в безразмерном виде. В качестве характерного размера выберем величину стационарного зазора. Перейдем к безразмерным величинам  $z, x, y, \tau$  и  $w$ :

$$z = \frac{Z}{S_{st}}, \quad x = \frac{X}{S_{st}}, \quad y = \frac{Y}{S_{st}},$$

$$\tau = \frac{V_{et}}{S_{st}} t = \frac{k\eta_0(1-\alpha)}{S_{st}^2} t, \quad w = \frac{W}{U},$$

$$\tilde{\eta}(\sigma) = \frac{\eta(\kappa E_n)}{\eta_0}. \quad (6)$$

При этом согласно (4) и (6)

$$\operatorname{Im} \left( \frac{\partial z}{\partial \tau} \frac{\partial z}{\partial \sigma} \right) = -\tilde{\eta}(\sigma) \frac{\partial \psi}{\partial \sigma}, \quad (7)$$

$$v_{et} = -\frac{dy_{A'}}{d\tau} = 1, \quad v_{ecm} = -\frac{dy_A}{d\tau} = \frac{1-\alpha s(\tau)}{s(\tau)(1-\alpha)},$$

$$s = \frac{S}{S_{st}}, \quad \frac{ds}{d\tau} = v_{ecm} - v_{et}. \quad (8)$$

Конформное отображение  $w(\chi)$  (рис. 4, в) осуществляется формулой  $w = \varphi + i\psi = i\chi$ ,  $\frac{dw}{d\chi} = i$ .

Функцию  $z(\chi, \tau)$  представим в виде суммы  $z(\chi, \tau) = z_0(\chi, \tau) + z_\Delta(\chi, \tau)$ , где  $z_0(\chi, \tau)$  – известная функция с особенностями, выбираемая из условия равенства нулю на бесконечности мнимой части  $z_\Delta(\chi, \tau)$ ,  $z_\Delta(\chi, \tau)$  – искомая функция. В неподвижной системе координат

$$z(\chi, \tau) = s(\tau)\chi - i \int_0^\tau v_{ecm}(\tau_1) d\tau_1 + \mu(\tau) \operatorname{th} \frac{\pi\chi}{2} + z_\Delta(\chi, \tau), \quad (9)$$

где второе слагаемое определяет движение асимптоты к анодной поверхности вниз, третье – функция, отображающая полосу на полуплоскость с горизонтальным разрезом, проходящим через бесконечность. Параметр  $\mu(\tau)$  определяется отношением  $l = L/S_{st}$  к  $s(\tau)$ .

Функция  $z_\Delta(\chi, \tau)$  получается следующим образом. Значения  $\operatorname{Im} z_\Delta(\sigma_m, \tau_j) = y_m$  на каждом шаге известны. Примем  $\operatorname{Im} z_\Delta(\sigma_n, \tau) = 0$ , поскольку  $z_\Delta(\sigma, \tau)$  быстро (как экспонента) убывает при  $\sigma \rightarrow \pm\infty$ . Значения  $\operatorname{Im} z_\Delta(\sigma, \tau)$  в промежуточных между узловыми точках найдем с помощью кубического сплайна  $P(\sigma, \tau)$ , имеющего две непрерывные производные.

Для восстановления функции  $z_\Delta(\chi, \tau)$  используем формулу Шварца с учетом того, что  $z_\Delta(\chi, \tau)$  аналитическая функция, имеющая чисто действительные значения на прямой  $\operatorname{Im}\chi=1$

$$z_\Delta(\chi, \tau) = \operatorname{sh} \pi\chi \int_0^\infty P(\sigma, \tau) \frac{d\sigma}{\operatorname{ch} \pi\sigma - \operatorname{ch} \pi\chi}. \quad (10)$$

Производная равна

$$\frac{dz}{d\chi}(\chi, \tau) = s(\tau) + \frac{\pi}{2} \frac{\mu(\tau)}{\operatorname{ch}^2 \frac{\pi\chi}{2}} + \frac{\partial z_\Delta}{\partial \chi}(\chi, \tau),$$

$$\frac{\partial z_\Delta}{\partial \chi}(\chi, \tau) = \int_0^\infty \operatorname{Im} \frac{\partial z_\Delta}{\partial \sigma}(\sigma, \tau) \frac{\operatorname{sh} \pi\sigma}{\operatorname{ch} \pi\sigma - \operatorname{ch} \pi\chi} d\sigma. \quad (11)$$

Для определения  $\mu(\tau)$  запишем уравнение для полуширины щели ЭИ

$$l = s(\tau)\gamma(\tau) + \mu(\tau) \operatorname{cth} \frac{\pi\gamma(\tau)}{2} + z_\Delta(\gamma(\tau) + i, \tau). \quad (12)$$

На плоскости  $\chi$  обозначим  $\gamma(\tau) + i$  образ точки  $G$ , определяемый уравнением

$$\frac{\partial z}{\partial \sigma} = s(\tau) - \mu(\tau) \frac{\pi}{2 \operatorname{sh}^2 \frac{\pi\gamma(\tau)}{2}} + \frac{\partial z_\Delta}{\partial \sigma}(\gamma(\tau) + i, \tau) = 0. \quad (13)$$

так как  $G$  является точкой возврата. Таким образом, параметры  $\mu(\tau)$  и  $\gamma(\tau)$  определяются на каждом временном шаге путем решения системы уравнений (12), (13).

Нестационарная задача сводится к решению системы обыкновенных дифференциальных уравнений численным методом с конечным шагом по времени  $\Delta\tau$ . При этом на каждом временном шаге  $\tau_j$  решаются задачи конформного отображения полосы параметрической плоскости  $\chi$  на физическую плоскость  $z$ . В полном объеме эта задача решается только при  $\tau=0$ , так как после каждого шага по времени значения переменных  $u_m(\tau_j)$  являются известными, и остается только подставить их в сплайн и интеграл Шварца (10). После этого остается решить краевую задачу: найти частную производную  $\partial z_\Delta / \partial \tau(\chi, \tau_j)$  как аналитическую функцию комплексного параметра  $\chi$ , удовлетворяющую краевому условию (7).

Для решения этой задачи применяется способ, аналогичный применяемому для определения конформного отображения. Искомыми параметрами на каждом временном шаге  $\tau_j = j\Delta\tau$  будут значения  $\operatorname{Im} \partial z_\Delta / \partial \tau(\sigma_m, \tau_j) = q_m$ . Значения

$\operatorname{Im} \partial z_\Delta / \partial \tau(\sigma, \tau_j)$  в промежуточных между узловыми точками найдем с помощью кубического

сплайна  $P(\sigma, \tau)$ . Для восстановления  $\partial z_{\Delta} / \partial \tau(\chi, \tau_j)$  используем формулу Шварца (10).

Производная  $\partial z / \partial \tau$  при  $\chi = \sigma + i0$

$$\frac{\partial z}{\partial \tau} = \frac{ds}{d\tau} \sigma - iv_{ecm} + \frac{d\mu}{d\tau} \operatorname{th} \frac{\pi\sigma}{2} + \frac{\partial z_{\Delta}}{\partial \tau}. \quad (14)$$

Значения  $q_m$  определяются методом коллокаций по краевому условию (7) с учетом (11), (15) и того, что  $\psi = \sigma$ . На катоде краевое условие  $\operatorname{Im}z(\sigma+i)=s$  выполняется за счет выбора вида искомой функции (9). Численно задача решается методом предиктор-корректор второго порядка с использованием сплайна и интеграла Шварца на каждом временном шаге.

### 5. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 5 показаны формы обрабатываемой поверхности при  $l=2$  (шаг по  $\tau$  равен 2,5) для  $\alpha=0$ . Картина в системе координат, связанной с подвижной асимптотической поверхностью анода (рис. 5, а), позволяет увидеть формирование стационарного выступа на обрабатываемой поверхности, форма которой рассчитана по формуле [6]

$$z = \frac{1}{\pi} \left( \ln \frac{\sqrt{\zeta+1}-1}{\sqrt{\zeta+1}+1} + 4i \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\sigma_0}{2} \right) \frac{\sqrt{\zeta}}{\sqrt{\zeta+1}} \right) - i.$$

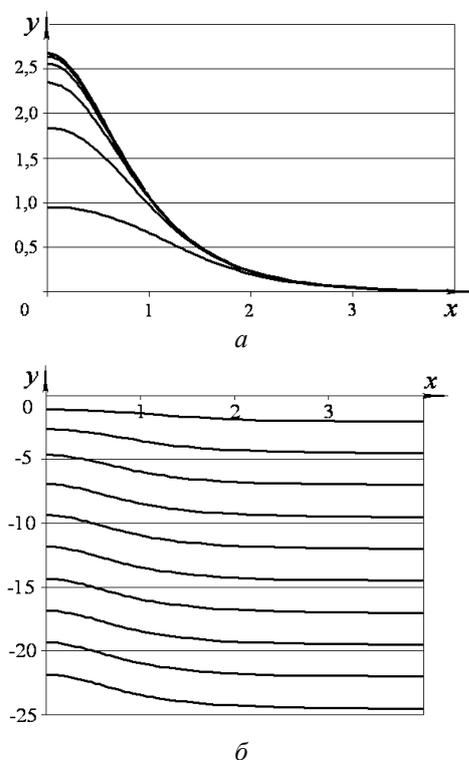


Рис. 5. Формы обрабатываемой поверхности: а – в системе координат, связанной с подвижной поверхностью анода; б – в неподвижной системе

Картина в неподвижной системе координат (рис. 5, б) показывает ход процесса растворения и толщину растворенного припуска.

На рис. 6 показаны формы нестационарной обрабатываемой поверхности при различных  $l$ :  $l=1$  (рис. 6, а) и  $l=3$  (рис. 6, б) для  $\alpha=0,5$ .

Видно, что при  $l=1$  наблюдается установление стационарной формы, однако при  $l=3$  стационарное решение не устанавливается, а происходит неограниченный рост высоты выступа. Это объясняется тем, что  $l=1$  напряженность в верхней точке выступа имеет значения большие, чем  $E_1$ , а при  $l=3$  за счет отдаления от кромок ЭИ напряженность становится меньше, чем  $E_1$  (с начала процесса или с некоторого момента времени), и растворения в этих точках не происходит.

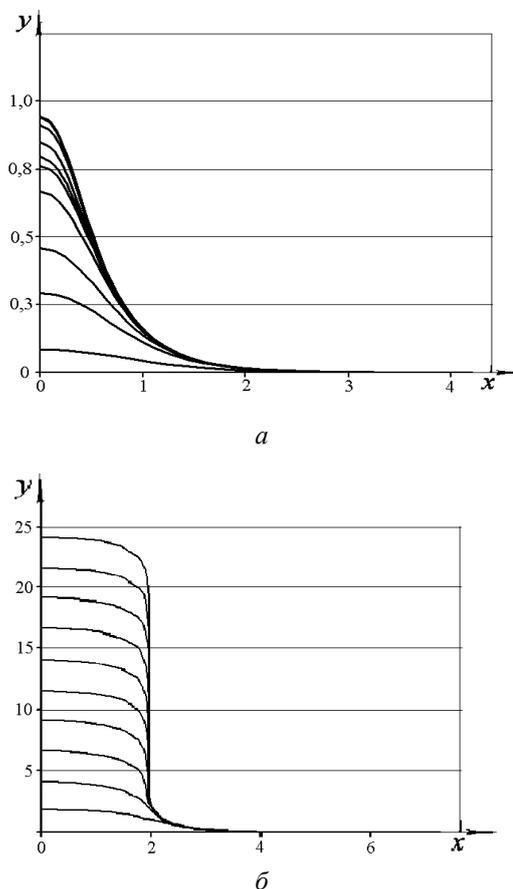


Рис. 6. Формы обрабатываемой поверхности для  $\alpha=0,5$ : а –  $l=1$  ( $\Delta\tau=5$ ); б –  $l=3$  ( $\Delta\tau=20$ )

Было проведено сравнение форм выступов, полученных экспериментально и расчетом. Расхождение межэлектродного зазора порядка 10–20% наблюдается в области, близкой к основанию («прикомлевой»).



Рис. 7. Сравнение экспериментальной и расчетной формы щеточного элемента

При расчете формы с помощью предложенного численного метода и использования экспериментальной зависимости  $\eta(j)$  погрешность существенно уменьшается (рис. 7).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) Проведено экспериментальное определение зависимости выхода по току от плотности тока для сталей двух марок: 12Х18Н9Т и 10Х11Н23Т3МР и форм выступов, возникающих на обрабатываемой поверхности при изготовлении уплотнений газоздушного тракта ГТД.

2) На основе ТФКП предложена новая теоретико-эмпирическая двумерная математическая модель нестационарного процесса импульсной ЭХО вибрирующим ЭИ. Найдены формы выступов, возникающих на обрабатываемой поверхности при обработке плоским ЭИ со щелью.

3) С помощью методов фильтрации численных результатов найдены закономерности и временные параметры, характеризующие скорость установления стационарных форм обрабатываемой поверхности. Показано, что изменение характерных размеров нестационарного решения происходит по экспоненциальному закону. Найдены оценки вычислительной погрешности полученных численных значений.

4) Сравнение форм выступов на обрабатываемой поверхности, полученных экспериментально и теоретически показало их удовлетворительное совпадение.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маннапов А. Р., Дрозденко В. Н., Серавкин Н. В., Зайцев А. Н. Применение прецизионных электрохимических станков серии «ЕТ» в производстве деталей для современных авиадвигателей // Двигатель. 2010. № 4 (70). С. 26–29.

[[ A. R. Mannapov, V. N. Drozdenko, N. V. Seravkin, A. N. Zaytsev, "Precision electrochemical machines of series "ET" using in the components production for modern engines" (in Russian), in Dvigatel, no. 4 (70), pp. 26–29, 2010. ]]

2. Маннапов А. Р., Зайцев А. Н. Технологические показатели электрохимического формирования вставок щеточных уплотнений // Вестник УГАТУ. Уфа. 2008. Т. 11, № 2 (29). С. 131–138. [[ A. R. Mannapov, A. N. Zaytsev, "Technological parameters of the electrochemical forming brush seals" (in Russian), Vestnik UGATU, vol. 11, no. 2 (29), pp. 131-138, 2008. ]]

3. Павлинич С. П., Маннапов А. Р., Гимаев Н. З., Зайцев А. Н. Электрохимическое формообразование элементов аэродинамических уплотнений // Известия вузов. Авиационная техника. Казань. 2008. № 3. С. 69–73. [[ S. P. Pavlinich, A. R. Mannapov, N. Z. Gimaev, A. N. Zaytsev, "Electrochemical forming of elements of aerodynamic seals" (in Russian), Izvestiya vuzov. Aviatsionnaya tekhnika, no. 3, pp. 69-73, 2008. ]]

4. Маннапов А. Р., Зайцев А. Н. Особенности электрохимической вырезки массивов малоразмерных выступов тонкой перфорированной пластиной // Труды ГОСНИТИ. М., 2010. Т. 106. С. 86–90. [[ A. R. Mannapov, A. N. Zaytsev, "Features electrochemical cutting arrays of small protrusions thin perforated plate" (in Russian), Trudi GOSNITI, vol. 106, pp. 86-90, 2010. ]]

5. Клоков В. В. Электрохимическое формообразование. Казань: КГУ, 1984. 80 с. [[ V. V. Klokov "Electrochemical shaping" (in Russian), Kazan: KGU, 1984. ]]

6. Каримов А. Х., Клоков В. В., Филатов Е.И. Методы расчета электрохимического формообразования. Казань: КГУ, 1990. 387 с. [[ A. H. Karimov, V. V. Klokov and E. I. Filatov, "Methods for calculating of the electrochemical shaping" (in Russian), Kazan: KGU, 1990. ]]

7. Житников В. П., Зайцев А. Н. Импульсная электрохимическая размерная обработка. М.: Машиностроение, 2008. 413 с. [[ V. P. Zhitnikov, A. N. Zaytsev, "Pulse electrochemical machining" (in Russian), Moscow: Mashinostroyeniye, 2008. ]]

8. Житников В. П., Шерыхалина Н. М. Моделирование течений несжимаемой жидкости с применением методов многокомпонентного анализа. Уфа: Гилем, 2009. 336 с. [[ V. P. Zhitnikov, N. M. Sherykhalina, Modeling of weighted fluid flows using the methods of multi-component analysis, (in Russian). Ufa: Gilem, 2009. ]]

**9. Маннапов А. Р., Житников В. П., Поречный С. С.**

Полуэмпирическая математическая модель нестационарного процесса импульсной электрохимической обработки вибрирующим электродом-инструментом в локально-одномерном приближении // Вестник УГАТУ. 2011. Т. 15, № 3 (43). С. 60–66. [[ А. Р. Маннапов, В. П. Житников, С. С. Поречный, "Semi-empirical mathematical model of non-stationary process of pulse electrochemical machining with vibrating electrode-tool in a locally one-dimensional approximation" (in Russian), Vestnik UGATU, vol. 15, no. 3 (43), pp. 60–66, 2011. ]]

**10. Петров Ю. Н., Корчагин Г. Н., Зайдман Г. Н., Саушкин Б. П.** Основы повышения точности электрохимического формообразования. Кишинев: Штиинца, 1977. 152 с. [[ Yu. N. Korchagin, G. N. Zaydman, B. P. Saushkin, "Basics of improve the accuracy of electrochemical shaping improving" (in Russian), Kazan: KGU, 1984. ]]

**11. Миназетдинов Н. М.** Об одной задаче размерной электрохимической обработки // ПМТФ. 2009. Т. 50, №3. С. 214–220. [[ N. M. Minazetdinov "On one problem of dimensional electrochemical machining" (in Russian), PMTF, vol. 50, no. 3, pp. 214–220, 2009. ]]

**ОБ АВТОРАХ**

**ЖИТНИКОВ Владимир Павлович**, проф. каф. выч. матем. и кибернетики. Дипл. инж.-физ. (МФТИ, 1973). Д-р физ.-мат. наук по мех. жидкости, газа и плазмы (Казанск. ун-т, 1993). Засл. деят. науки РБ. Иссл. в обл. волн. течений жидкости, э/хим. формообразования, числ.-аналит. методов.

**ЖИТНИКОВА Наталья Ивановна**, доц. каф. выч. матем. и кибернетики. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1972). Канд. техн. наук по дин. и прочн. машин, приборов и аппаратуры (УГАТУ, 1994). Иссл. в обл. мех. оболочек, числ. методов.

**ПОРЕЧНЫЙ Сергей Сергеевич**, доц. каф. выч. матем. и кибернетики. Дипл. магистр по информат. программн. обеспечению САПР (УГАТУ, 2006). Канд. физ.-мат. наук по механике жидкости, газа и плазмы (БашГУ, 2009). Иссл. в обл. решения задач матем. моделирования физ. процессов.

**METADATA**

**Title:** Experimental investigation and mathematical modeling of seals gas-air path manufacturing technology

**Authors:** V.P. Zhitnikov<sup>1</sup>, N. I. Zhitnikova<sup>2</sup>, S. S. Porechny<sup>3</sup>

**Affiliation:**

<sup>1</sup> Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

<sup>2</sup> Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

<sup>3</sup> Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>3</sup>porechny@mail.ru.

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 20, no. 4 (74), pp. 84-91. 2016. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** The problem of the radial seals of gas-air path modeling by the impulse electrochemical machining is considered. For experimental investigation the electrode-tool as a tube is used. The non-stationary shaping problem of the machining by the electrode-tool as a plate with a gap is solved. The dependence of the current efficiency on the current density was taken as a linear fractional function. The problem solution using the Schwartz formula is obtained.

**Key words:** impulse electrochemical machining; nonstationary shaping; seal gas path; alternating current efficiency.

**About authors:**

**ZHITNIKOV, Vladimir Pavlovich**, Prof., Dept. of Common Sciens. Dipl. Engineer-physicist (Moscow Physical-Technical Inst., 1973). Cand. of Phys.-Math. Sci. (MIPT, 1984), Dr. of Phys.-Math. Sci. (KSU, 1993).

**ZHITNIKOVA, Natalya Ivanovna**, Docent, Dept. of Computer Sciens. Dipl. Engineer-mech. (UGATU, 1972). Cand. of Techn. Sci. (UGATU, 1994).

**PORECHNY, Sergey Sergeevich**, Docent, Dept. of Common Sciens. master's degree (UGATU, 2006). Cand. of Phys.-Math. Sci. (BashGU, 2009).