

## Содержание

<b>Математическое моделирование .....</b>	<b>2</b>
<i>Попов И.П.</i> Скалярная и векторная производные векторных полей и их приложение к задачам механики .....	2
<i>Парсункин Б.Н., Ахметов У.Б., Андреев С.М., Чистяков Д.В.</i> Математическое обеспечение способа оптимального управления энергетическим режимом электродуговых агрегатов.....	8
<i>Дубский Г.А., Егорова Л.Г.</i> Физико-математическое моделирование процесса переноса заряда в металле при его нагревании и деформации.....	16
<i>Ошурков В.А., Логунова О.С., Павлов В.В.</i> О выборе критериев геометрического подобия для моделирования процесса загрузки металлического лома в рабочее пространство дуговой сталеплавильной печи .....	24
<b>Программное обеспечение систем .....</b>	<b>30</b>
<i>Бовшик П.А., Берляков Е.В., Ахметшин И.Н., Логунов С.М.</i> Мобильное приложение технического обслуживания и ремонта оборудования промышленного предприятия: опыт разработки и внедрения.....	30
<i>Кузьмин А.В., Лысов В.А., Щеголев А.В., Иванюк М.В.</i> Пооперационное параметрическое моделирование в Компас-3D процесса ротационной вытяжки цилиндрической оболочки с фигурным контуром осевого сечения .....	37
<i>Баранков В.В.</i> Облачный вариант системы учета продажи товаров при оплате в рассрочку.....	45
<b>Краткое сообщение .....</b>	<b>49</b>
<i>Ильина Е.А., Арефьева Д.Я.</i> Структура лингвистической переменной для определения ложности публикационных коллабораций .....	49

## Information about the paper in English

<b>Mathematical modeling .....</b>	<b>2</b>
<i>Popov I.P.</i> Scalar and vector derivatives of vector fields and their application to problems of mechanics .....	2
<i>Parsunkin B.N., Logunova O.S., Andreev S.M., Ahkmetov U.B., Chistyakov D.V.</i> Optimal control of energy mode in electric arc units .....	8
<i>Dubskij G.A., Egorova L.G.</i> Physical and mathematical simulation of charge transfer in metals by heating and deformation.....	16
<i>Oshurkov V.A., Logunova O.S., Pavlov V.V.</i> On the election of the similarity geometric criteria for modeling the process of charge materials in an electric arc furnace .....	24
<b>Software systems .....</b>	<b>30</b>
<i>Bovshik P.A., Berlykov E.V., Akhmetshin I.N., Logunov S.M.</i> Mobile application of technical maintenance and repair of industrial enterprise equipment: experience of development and implementation.....	30
<i>Kuzmin A.V., Lysov V.A., Schegolev A.V., Ivanyuk M.V.</i> Step-by-step parametric simulation of rotary drawing process of a cartridge tube with axial section of figured contour in Kompas-3D.....	37
<i>Barankov V.V.</i> Cloud variant of system accounting for sale of goods in payment by installments.....	45

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

## MATHEMATICAL MODELING

УДК 51-72

### СКАЛЯРНАЯ И ВЕКТОРНАЯ ПРОИЗВОДНЫЕ ВЕКТОРНЫХ ПОЛЕЙ И ИХ ПРИЛОЖЕНИЕ К ЗАДАЧАМ МЕХАНИКИ

Попов И.П.

**Аннотация.** Вводятся в рассмотрение скалярная и векторная производные вектора по другому вектору, которые могут иметь приложение к решению задач механики. Доказывается теорема о представлении скалярной производной в виде комбинации частных производных. Отмечено, что при решении ряда задач механики для упрощения вычислений систему координат выбирают таким образом, чтобы, по крайней мере, направление некоторых векторов совпадало с одной из координатных осей. Это порождает необходимость доказательства двух теорем для двухмерного и одномерного случаев. Доказывается теорема о представлении векторной производной в виде комбинации частных производных. Доказываются две аналогичные теоремы для двухмерного и одномерного случаев. В качестве характерных частных случаев рассматриваются скалярная и векторная производные по радиус-вектору, порождающие соответствующие формализмы, связывающие эти производные с оператором набла. Приводятся примеры приложения полученных результатов к задачам механики.

**Ключевые слова:** векторное поле, скалярная производная, векторная производная, вектор Умова, ускорение, скорость.

#### Введение

Работа посвящена рассмотрению операций дифференцирования на пространстве векторных полей и гладких функций в  $\mathcal{R}^3$ . В приложениях достаточно широко используется производная скалярной функции по вектору. В какой-то мере подобно ей определяется производная вектора по другому вектору

$$\frac{d\mathbf{a}}{d\mathbf{b}} = \frac{\partial \mathbf{a}}{\partial x} b_x + \frac{\partial \mathbf{a}}{\partial y} b_y + \frac{\partial \mathbf{a}}{\partial z} b_z.$$

Вместе с тем, формально интерпретируя производную как отношение дифференциалов, можно ввести в рассмотрение *скалярную* и *векторную* производные вектора по другому вектору, которые могут иметь приложение к решению задач механики [1-4].

#### Деление векторов

**Определение 1.** Частное  $a/\mathbf{b}$  от деления скаляра  $a$  на вектор  $\mathbf{b}$  есть вектор

$$\mathbf{c} = \frac{a}{\mathbf{b}} = \frac{a}{\mathbf{b}} \cdot \frac{\mathbf{b}}{\mathbf{b}} = \frac{a\mathbf{b}}{\mathbf{b} \cdot \mathbf{b}} = \frac{a}{b^2} \mathbf{b}.$$

Обратно,

$$\mathbf{b} \cdot \mathbf{c} = \mathbf{b} \cdot \frac{a}{b^2} \mathbf{b} = a.$$

В частности,

$$\frac{1}{\mathbf{b}} = \frac{\mathbf{b}}{b^2}.$$

**Определение 2.** Частное  $\mathbf{e}/\mathbf{b}$  от скалярного деления вектора  $\mathbf{e}$  на вектор  $\mathbf{b}$  есть скаляр

$$p = \frac{\mathbf{e}}{\mathbf{b}} = \mathbf{e} \cdot \frac{1}{\mathbf{b}} = \mathbf{e} \cdot \frac{\mathbf{b}}{b^2} = \frac{\mathbf{e} \cdot \mathbf{b}}{b^2} = \frac{c}{b^2} = \frac{e}{b} \cos\theta,$$

где  $\theta$  – угол между векторами  $\mathbf{e}$  и  $\mathbf{b}$ . При этом

$$\frac{\mathbf{e}}{\mathbf{b}} \cdot \frac{\mathbf{b}}{\mathbf{e}} = \cos^2\theta.$$

**Определение 3.** Частное  $\mathbf{e} \div \mathbf{b}$  от векторного деления вектора  $\mathbf{e}$  на вектор  $\mathbf{b}$  есть вектор

$$\mathbf{q} = \mathbf{e} \div \mathbf{b} = \mathbf{e} \times \frac{1}{\mathbf{b}} = \mathbf{e} \times \frac{\mathbf{b}}{b^2} = \frac{\mathbf{e} \times \mathbf{b}}{b^2} = \frac{\mathbf{d}}{b^2} = \frac{e}{b} \cdot \frac{\mathbf{d}}{d} \cdot \sin\theta.$$

При этом

$$(\mathbf{e} \div \mathbf{b}) \cdot (\mathbf{b} \div \mathbf{e}) = -\sin^2\theta,$$

$$\frac{\mathbf{e}}{\mathbf{b}} \cdot \frac{\mathbf{b}}{\mathbf{e}} - (\mathbf{e} \div \mathbf{b}) \cdot (\mathbf{b} \div \mathbf{e}) = 1,$$

$$p^2 + q^2 = \frac{e^2}{b^2}.$$

**Теорема 1.** Если известны частные от скалярного  $p$  и векторного  $q$  деления двух векторов  $e$  и  $b$ , а также делитель  $b$ , то делимое определяется как

$$e = bp + b \times q.$$

*Доказательство:*

$$bp + b \times q = \frac{1}{b^2} [b(e \cdot b) + b \times (e \times b)] = \frac{1}{b^2} [b(e \cdot b) + e(b \cdot b) - b(b \cdot e)] = e. \blacksquare$$

**Теорема 2.** Если известны частные от скалярного  $p$  и векторного  $q$  деления двух векторов  $e$  и  $b$ , а также делимое  $e$ , то делитель определяется, как

$$b = \frac{pe + q \times e}{p^2 + q^2}.$$

*Доказательство:*

$$\frac{pe + q \times e}{p^2 + q^2} = \frac{1}{b^2} \cdot \frac{b^2}{e^2} [(e \cdot b)e + (e \times b) \times e] = \frac{1}{e^2} [(e \cdot b)e + b(e \cdot e) - e(e \cdot b)] = b. \blacksquare$$

**Скалярная производная вектора по другому вектору**

**Определение 4.** Операция

$$da \cdot \frac{1}{db}$$

называется скалярной производной векторного поля  $a = a_x i + a_y j + a_z k$  по векторному полю  $b = b_x i + b_y j + b_z k$ .

**Теорема 3.** Имеет место формула

$$da \cdot \frac{1}{db} = \frac{da_x}{db_x} + \frac{da_y}{db_y} + \frac{da_z}{db_z}. \quad (1)$$

*Доказательство:*

$$\begin{aligned} da \cdot \frac{1}{db} &= d(a_x i + a_y j + a_z k) \cdot \frac{1}{d(b_x i + b_y j + b_z k)} = \\ &= (da_x i + da_y j + da_z k) \cdot \frac{1}{db_x i + db_y j + db_z k} = \\ &= da_x i \cdot \frac{1}{db_x i + db_y j + db_z k} \cdot \frac{db_x i}{db_x i} + da_y j \cdot \frac{1}{db_x i + db_y j + db_z k} \cdot \frac{db_y j}{db_y j} + \\ &+ da_z k \cdot \frac{1}{db_x i + db_y j + db_z k} \cdot \frac{db_z k}{db_z k} = da_x i \cdot \frac{db_x i}{(db_x i + db_y j + db_z k) \cdot db_x i} + \\ &+ da_y j \cdot \frac{db_y j}{(db_x i + db_y j + db_z k) \cdot db_y j} + da_z k \cdot \frac{db_z k}{(db_x i + db_y j + db_z k) \cdot db_z k} = \\ &= \frac{da_x i \cdot db_x i}{db_x^2} + \frac{da_y j \cdot db_y j}{db_y^2} + \frac{da_z k \cdot db_z k}{db_z^2} = \\ &= \frac{da_x db_x}{db_x^2} + \frac{da_y db_y}{db_y^2} + \frac{da_z db_z}{db_z^2} = \frac{da_x}{db_x} + \frac{da_y}{db_y} + \frac{da_z}{db_z}. \blacksquare \end{aligned}$$

Представляет интерес частный случай, когда берется скалярная производная по радиус-вектору  $r = xi + yj + zk$ .

$$da \cdot \frac{1}{dr} = \frac{\partial a_x}{\partial x} + \frac{\partial a_y}{\partial y} + \frac{\partial a_z}{\partial z} = \text{div} a = \nabla \cdot a.$$

**Следствие.** Имеет место формализм

$$d \cdot \frac{1}{dr} = \nabla.$$

*Замечание.* При решении ряда задач механики для упрощения вычислений систему координат выбирают таким образом, чтобы, по крайней мере, направление некоторых векторов совпадало с одной из координатных осей [5-6]. Если это касается вектора, по которому предполагается выполнить дифференцирование, то в таких случаях формула (1) использоваться не может, поскольку некоторые дифференциалы этого вектора равны нулю [7-8].

Это обстоятельство обуславливает следующие две теоремы.

**Теорема 4.** Имеет место формула

$$d\mathbf{a} \cdot \frac{1}{d(b_1\mathbf{e}_1 + b_2\mathbf{e}_2)} = \frac{da_1}{db_1} + \frac{da_2}{db_2},$$

где  $\mathbf{e}$  – орты.

*Доказательство:*

$$\begin{aligned} d\mathbf{a} \cdot \frac{1}{d(b_1\mathbf{e}_1 + b_2\mathbf{e}_2)} &= d(a_1\mathbf{e}_1 + a_2\mathbf{e}_2 + a_3\mathbf{e}_3) \cdot \frac{1}{d(b_1\mathbf{e}_1 + b_2\mathbf{e}_2)} = \\ &= (da_1\mathbf{e}_1 + da_2\mathbf{e}_2 + da_3\mathbf{e}_3) \cdot \frac{1}{db_1\mathbf{e}_1 + db_2\mathbf{e}_2} = \\ &= \frac{da_1\mathbf{e}_1}{db_1\mathbf{e}_1 + db_2\mathbf{e}_2} \cdot \frac{db_1\mathbf{e}_1}{db_1\mathbf{e}_1} + \frac{da_2\mathbf{e}_2}{db_1\mathbf{e}_1 + db_2\mathbf{e}_2} \cdot \frac{db_2\mathbf{e}_2}{db_2\mathbf{e}_2} + \frac{da_3\mathbf{e}_3}{db_1\mathbf{e}_1 + db_2\mathbf{e}_2} \cdot \frac{db_1\mathbf{e}_1 + db_2\mathbf{e}_2}{db_1\mathbf{e}_1 + db_2\mathbf{e}_2} = \\ &= \frac{da_1\mathbf{e}_1 \cdot db_1\mathbf{e}_1}{(db_1\mathbf{e}_1 + db_2\mathbf{e}_2) \cdot db_1\mathbf{e}_1} + \frac{da_2\mathbf{e}_2 \cdot db_2\mathbf{e}_2}{(db_1\mathbf{e}_1 + db_2\mathbf{e}_2) \cdot db_2\mathbf{e}_2} + \frac{da_3\mathbf{e}_3 \cdot (db_1\mathbf{e}_1 + db_2\mathbf{e}_2)}{(db_1\mathbf{e}_1 + db_2\mathbf{e}_2)^2} = \\ &= \frac{da_1 db_1}{db_1^2} + \frac{da_2 db_2}{db_2^2} = \frac{da_1}{db_1} + \frac{da_2}{db_2}. \blacksquare \end{aligned}$$

Аналогично доказывается

**Теорема 5.** Имеет место формула

$$d\mathbf{a} \cdot \frac{1}{db_1\mathbf{e}_1} = \frac{da_1}{db_1}.$$

**Пример 1.** Тело массой  $m$  движется со скоростью

$$\mathbf{v} = \mathbf{i} \frac{1}{3} v + \mathbf{j} \frac{\sqrt{3}}{3} v + \mathbf{k} \frac{\sqrt{5}}{3} v.$$

В соответствии с [9, 10] интегральный (в смысле объемного интегрирования) вектор Умова в этом случае равен

$$\mathbf{u} = \mathbf{i} \frac{1}{162} mv^3 + \mathbf{j} \frac{3\sqrt{3}}{162} mv^3 + \mathbf{k} \frac{5\sqrt{5}}{162} mv^3.$$

При этом

$$d\mathbf{u} \cdot \frac{1}{\mathbf{v}} = \frac{du_x}{dv_x} + \frac{du_y}{dv_y} + \frac{du_z}{dv_z} = \frac{1}{18} mv^2 + \frac{3}{18} mv^2 + \frac{5}{18} mv^2 = \frac{1}{2} mv^2,$$

что является кинетической энергией.

**Векторная производная вектора по другому вектору**

**Определение 5.** Операция

$$d\mathbf{a} \times \frac{1}{d\mathbf{b}}$$

называется векторной производной векторного поля  $\mathbf{a}$  по векторному полю  $\mathbf{b}$ .

**Теорема 6.** Имеет место формула

$$d\mathbf{a} \times \frac{1}{d\mathbf{b}} = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{da_y}{db_z} - \frac{da_z}{db_y} \right) \mathbf{i} + \left( \frac{da_z}{db_x} - \frac{da_x}{db_z} \right) \mathbf{j} + \left( \frac{da_x}{db_y} - \frac{da_y}{db_x} \right) \mathbf{k} \right]. \quad (2)$$

*Доказательство:*

$$\begin{aligned} d\mathbf{a} \times \frac{1}{d\mathbf{b}} &= d(a_x\mathbf{i} + a_y\mathbf{j} + a_z\mathbf{k}) \times \frac{1}{d(b_x\mathbf{i} + b_y\mathbf{j} + b_z\mathbf{k})} = \\ &= (da_x\mathbf{i} + da_y\mathbf{j} + da_z\mathbf{k}) \times \frac{1}{db_x\mathbf{i} + db_y\mathbf{j} + db_z\mathbf{k}} = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= da_x \mathbf{i} \times \frac{1}{db_x \mathbf{i} + db_y \mathbf{j} + db_z \mathbf{k}} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{db_y \mathbf{j}}{db_y \mathbf{j}} + \frac{db_z \mathbf{k}}{db_z \mathbf{k}} \right) + \\
 &= da_y \mathbf{j} \times \frac{1}{db_x \mathbf{i} + db_y \mathbf{j} + db_z \mathbf{k}} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{db_x \mathbf{i}}{db_x \mathbf{i}} + \frac{db_z \mathbf{k}}{db_z \mathbf{k}} \right) + \\
 &= da_z \mathbf{k} \times \frac{1}{db_x \mathbf{i} + db_y \mathbf{j} + db_z \mathbf{k}} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{db_x \mathbf{i}}{db_x \mathbf{i}} + \frac{db_y \mathbf{j}}{db_y \mathbf{j}} \right) = \\
 &= da_x \mathbf{i} \times \frac{db_y \mathbf{j}}{2(db_x \mathbf{i} + db_y \mathbf{j} + db_z \mathbf{k}) \cdot db_y \mathbf{j}} + da_x \mathbf{i} \times \frac{db_z \mathbf{k}}{2(db_x \mathbf{i} + db_y \mathbf{j} + db_z \mathbf{k}) \cdot db_z \mathbf{k}} + \\
 &+ da_y \mathbf{j} \times \frac{db_x \mathbf{i}}{2(db_x \mathbf{i} + db_y \mathbf{j} + db_z \mathbf{k}) \cdot db_x \mathbf{i}} + da_y \mathbf{j} \times \frac{db_z \mathbf{k}}{2(db_x \mathbf{i} + db_y \mathbf{j} + db_z \mathbf{k}) \cdot db_z \mathbf{k}} + \\
 &+ da_z \mathbf{k} \times \frac{db_x \mathbf{i}}{2(db_x \mathbf{i} + db_y \mathbf{j} + db_z \mathbf{k}) \cdot db_x \mathbf{i}} + da_z \mathbf{k} \times \frac{db_y \mathbf{j}}{2(db_x \mathbf{i} + db_y \mathbf{j} + db_z \mathbf{k}) \cdot db_y \mathbf{j}} = \\
 &= \frac{da_x \mathbf{i} \times db_y \mathbf{j}}{2db_y^2} + \frac{da_x \mathbf{i} \times db_z \mathbf{k}}{2db_z^2} + \frac{da_y \mathbf{j} \times db_x \mathbf{i}}{2db_x^2} + \\
 &+ \frac{da_y \mathbf{j} \times db_z \mathbf{k}}{2db_z^2} + \frac{da_z \mathbf{k} \times db_x \mathbf{i}}{2db_x^2} + \frac{da_z \mathbf{k} \times db_y \mathbf{j}}{2db_y^2} = \\
 &= \frac{1}{2} \left( \frac{da_x db_y}{db_y^2} \mathbf{k} - \frac{da_x db_z}{db_z^2} \mathbf{j} - \frac{da_y db_x}{db_x^2} \mathbf{k} + \frac{da_y db_z}{db_z^2} \mathbf{i} + \frac{da_z db_x}{db_x^2} \mathbf{j} - \frac{da_z db_y}{db_y^2} \mathbf{i} \right) = \\
 &= \frac{1}{2} \left( \frac{da_x}{db_y} \mathbf{k} - \frac{da_x}{db_z} \mathbf{j} - \frac{da_y}{db_x} \mathbf{k} + \frac{da_y}{db_z} \mathbf{i} + \frac{da_z}{db_x} \mathbf{j} - \frac{da_z}{db_y} \mathbf{i} \right) = \\
 &= \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{da_y}{db_z} - \frac{da_z}{db_y} \right) \mathbf{i} + \left( \frac{da_z}{db_x} - \frac{da_x}{db_z} \right) \mathbf{j} + \left( \frac{da_x}{db_y} - \frac{da_y}{db_x} \right) \mathbf{k} \right]. \blacksquare
 \end{aligned}$$

Представляет интерес частный случай, когда берется векторная производная по радиус-вектору  $\mathbf{r}$ .

$$d\mathbf{a} \times \frac{1}{dr} = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{da_y}{dz} - \frac{da_z}{dy} \right) \mathbf{i} + \left( \frac{da_z}{dx} - \frac{da_x}{dz} \right) \mathbf{j} + \left( \frac{da_x}{dy} - \frac{da_y}{dx} \right) \mathbf{k} \right] = -\frac{1}{2} \text{rota} = -\frac{1}{2} \nabla \times \mathbf{a}.$$

**Следствие.** Имеет место формализм

$$d \times \frac{1}{dr} = -\frac{1}{2} \nabla \times.$$

Приведенное выше замечание обуславливает следующие две теоремы.

**Теорема 7.** Имеет место формула

$$d\mathbf{a} \times \frac{1}{db\mathbf{e}_1} = \frac{a_3}{db} \mathbf{e}_2 - \frac{a_2}{db} \mathbf{e}_3. \quad (3)$$

*Доказательство:*

$$\begin{aligned}
 d\mathbf{a} \times \frac{1}{db\mathbf{e}_1} &= d(a_1 \mathbf{e}_1 + a_2 \mathbf{e}_2 + a_3 \mathbf{e}_3) \times \frac{1}{db_1 \mathbf{e}_1} = (da_1 \mathbf{e}_1 + da_2 \mathbf{e}_2 + da_3 \mathbf{e}_3) \times \frac{1}{db_1 \mathbf{e}_1} = \\
 &= da_1 \mathbf{e}_1 \times \frac{1}{db_1 \mathbf{e}_1} \cdot \frac{db_1 \mathbf{e}_1}{db_1 \mathbf{e}_1} + da_2 \mathbf{e}_2 \times \frac{1}{db_1 \mathbf{e}_1} \cdot \frac{db_1 \mathbf{e}_1}{db_1 \mathbf{e}_1} + da_3 \mathbf{e}_3 \times \frac{1}{db_1 \mathbf{e}_1} \cdot \frac{db_1 \mathbf{e}_1}{db_1 \mathbf{e}_1} = \\
 &= da_1 \mathbf{e}_1 \times \frac{db_1 \mathbf{e}_1}{db_1 \mathbf{e}_1 \cdot db_1 \mathbf{e}_1} + da_2 \mathbf{e}_2 \times \frac{db_1 \mathbf{e}_1}{db_1 \mathbf{e}_1 \cdot db_1 \mathbf{e}_1} + da_3 \mathbf{e}_3 \times \frac{db_1 \mathbf{e}_1}{db_1 \mathbf{e}_1 \cdot db_1 \mathbf{e}_1} = \\
 &= \frac{da_1 \mathbf{e}_1 \times db_1 \mathbf{e}_1}{db^2} + \frac{da_2 \mathbf{e}_2 \times db_1 \mathbf{e}_1}{db^2} + \frac{da_3 \mathbf{e}_3 \times db_1 \mathbf{e}_1}{db^2} = \\
 &= \frac{da_2 db}{db^2} \mathbf{e}_3 + \frac{a_3 db}{db^2} \mathbf{e}_2 = \frac{a_3}{db} \mathbf{e}_2 - \frac{da_2}{db} \mathbf{e}_3. \blacksquare
 \end{aligned}$$

**Теорема 8.** Имеет место формула

$$d\mathbf{a} \times \frac{1}{d(b_1 \mathbf{e}_1 + b_2 \mathbf{e}_2)} = -\frac{da_3}{2db_2} \mathbf{e}_1 + \frac{da_3}{2db_1} \mathbf{e}_2 + \left( \frac{a_1}{db_2} - \frac{a_2}{db_1} \right) \mathbf{e}_3.$$

*Доказательство:*

$$\begin{aligned}
 d\mathbf{a} \times \frac{1}{d(b_1\mathbf{e}_1 + b_2\mathbf{e}_2)} &= d(a_1\mathbf{e}_1 + a_2\mathbf{e}_2 + a_3\mathbf{e}_3) \times \frac{1}{d(b_1\mathbf{e}_1 + b_2\mathbf{e}_2)} = \\
 &= (da_1\mathbf{e}_1 + da_2\mathbf{e}_2 + da_3\mathbf{e}_3) \times \frac{1}{db_1\mathbf{e}_1 + db_2\mathbf{e}_2} = \\
 &= da_1\mathbf{e}_1 \times \frac{1}{db_1\mathbf{e}_1 + db_2\mathbf{e}_2} \cdot \frac{db_2\mathbf{e}_2}{db_2\mathbf{e}_2} + da_2\mathbf{e}_2 \times \frac{1}{db_1\mathbf{e}_1 + db_2\mathbf{e}_2} \cdot \frac{db_1\mathbf{e}_1}{db_1\mathbf{e}_1} + \\
 &\quad + da_3\mathbf{e}_3 \times \frac{1}{db_1\mathbf{e}_1 + db_2\mathbf{e}_2} \cdot \frac{1}{2} \left( \frac{db_1\mathbf{e}_1}{db_1\mathbf{e}_1} + \frac{db_2\mathbf{e}_2}{db_2\mathbf{e}_2} \right) = \\
 &= da_1\mathbf{e}_1 \times \frac{db_2\mathbf{e}_2}{(db_1\mathbf{e}_1 + db_2\mathbf{e}_2)db_2\mathbf{e}_2} + da_2\mathbf{e}_2 \times \frac{db_1\mathbf{e}_1}{(db_1\mathbf{e}_1 + db_2\mathbf{e}_2)db_1\mathbf{e}_1} + \\
 &\quad + da_3\mathbf{e}_3 \times \frac{db_1\mathbf{e}_1}{2(db_1\mathbf{e}_1 + db_2\mathbf{e}_2)db_1\mathbf{e}_1} + da_3\mathbf{e}_3 \times \frac{db_2\mathbf{e}_2}{2(db_1\mathbf{e}_1 + db_2\mathbf{e}_2)db_2\mathbf{e}_2} = \\
 &= \frac{da_1\mathbf{e}_1 \times db_2\mathbf{e}_2}{db_2^2} + \frac{da_2\mathbf{e}_2 \times db_1\mathbf{e}_1}{db_1^2} + \frac{da_3\mathbf{e}_3 \times db_1\mathbf{e}_1}{2db_1^2} + \frac{da_3\mathbf{e}_3 \times db_2\mathbf{e}_2}{2db_2^2} = \\
 &= \frac{da_1db_2}{db_2^2} \mathbf{e}_3 - \frac{da_2db_1}{db_1^2} \mathbf{e}_3 + \frac{da_3db_1}{2db_1^2} \mathbf{e}_2 - \frac{da_3db_2}{2db_2^2} \mathbf{e}_1 = \\
 &= -\frac{da_3}{2db_2} \mathbf{e}_1 + \frac{da_3}{2db_1} \mathbf{e}_2 + \left( \frac{da_1}{db_2} - \frac{da_2}{db_1} \right) \mathbf{e}_3. \blacksquare
 \end{aligned}$$

**Пример 2.** Точка совершает вращательное движение с угловой скоростью  $\boldsymbol{\omega} = k\boldsymbol{\varepsilon}$

и тангенциальным ускорением

$$\mathbf{a}_\tau = -i\mathbf{a} \cdot \sin \frac{\boldsymbol{\varepsilon}t^2}{2} + j\mathbf{a} \cdot \cos \frac{\boldsymbol{\varepsilon}t^2}{2},$$

где  $k\boldsymbol{\varepsilon}$  – угловое ускорение.

В соответствии с (3)

$$d\mathbf{a}_\tau \times \frac{1}{d\boldsymbol{\omega}} = \frac{da_{\tau y}}{d\omega_z} \mathbf{i} - \frac{da_{\tau x}}{d\omega_z} \mathbf{j} = -i\mathbf{a}t \cdot \sin \frac{\boldsymbol{\varepsilon}t^2}{2} + j\mathbf{a}t \cdot \cos \frac{\boldsymbol{\varepsilon}t^2}{2} = \mathbf{v},$$

т.е. результат является линейной скоростью точки.

**Пример 3.** Скорость точки равна

$$\mathbf{v} = -i\omega R \sin \omega t + j\omega R \cos \omega t + k\omega^2 R t,$$

ускорение –

$$\mathbf{a} = -i\omega^2 R \cos \omega t - j\omega^2 R \sin \omega t + k\omega^2 R.$$

В соответствии с (2)

$$d\mathbf{a} \times \frac{1}{d\mathbf{v}} = \frac{1}{2} \left[ \frac{da_y}{dv_z} \mathbf{i} - \frac{da_x}{dv_z} \mathbf{j} + \left( \frac{da_x}{dv_y} - \frac{da_y}{dv_x} \right) \mathbf{k} \right] = -i\frac{\omega}{2} \cos \omega t - j\frac{\omega}{2} \sin \omega t - k\omega = -\omega^*.$$

### Список использованных источников

1. Попов, И.П. Механические аналоги реактивной мощности / И.П. Попов // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. – 2015. – № 3(30). – С. 37-39.
2. Попов, И.П. Комплексная мощность механических колебательных процессов / И.П. Попов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2016. – № 1. – С. 32-36.
3. Попов, И.П. Механическая мощность при колебательных технологических операциях / И.П. Попов // Вестник Псковского государственного университета. Технические науки. – 2015. – Вып. 2. – С. 15-18.
4. Попов, И.П. Интеграл Фурье и дискретные спектры / И.П. Попов // Математическое и программное обеспечение в промышленной и социальной сферах. – 2015. – № 2. – С. 9-12.
5. Попов, И.П. Колебательные системы с однородными элементами / И.П. Попов // Инженерная физика. – 2013. – № 3. – С. 52-56.
6. Попов, И.П. Свободные механические гармонические колебания, обусловленные преобразованием кинетической энергии в кинетическую / И.П. Попов // Вестник Курганского государственного университета. Естественные науки. – 2013. – Вып. 6. – № 3(30). – С. 76-77.
7. Попов, И.П. О некоторых операциях над векторами / И.П. Попов // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1: Математика. Физика. – 2014. – №5 (24). – С. 55-61.
8. Попов, И.П. Поверхностные градиент, дивергенция и ротор / И.П. Попов // Вестник Псковского государственного университета. Естественные и физико-математические науки. – 2014. – Вып. 5. – С. 159-172.

9. Попов, И.П. О мерах механического движения / И.П. Попов // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. – 2014. – № 3(26). – С. 13-15.
10. Попов, И.П. Применение принципа суперпозиции при математическом моделировании состояний объекта / И.П. Попов, В.Г. Чумаков, В.И. Чарыков // Математическое и программное обеспечение в промышленной и социальной сферах. – 2016. – Т. 4. – № 1. – С. 8-12.

Материал поступил в редакцию: 12.03.2017  
Материал принят к публикации: 25.04.2017

## INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

### SCALAR AND VECTOR DERIVATIVES OF VECTOR FIELDS AND THEIR APPLICATION TO PROBLEMS OF MECHANICS

*Popov I.P.*

**Abstract.** The work is devoted to the operations of differentiation in the space of vector fields and smooth functions. In mechanics, it is widely used derivative of a scalar function of the vector. To some extent, like it is determined by the derivative of the vector to another vector. However, formally interpreting the derivative as division differentials are entered in consideration of scalar and vector derived vector on another vector, which may have application to the solution of problems of mechanics. The definition of a derivative of a scalar vector field on another vector field. We prove a theorem on the representation of the scalar derivative in the form of a combination of partial derivatives. As a typical particular case is considered a scalar derivative in the radius vector, generating formalism linking it with the operator nabla. It is noted that in solving some problems in the mechanics to simplify the calculation coordinate system is chosen so that at least some vectors direction coincides with one of the coordinate axes. If it concerns the vector for derivation to be performed, in such cases, the formula for the three-dimensional case can not be used because some of this vector differentials are equal to zero. This circumstance makes it necessary to prove two theorems for the two-dimensional and one-dimensional case. The definition of a vector derivative of a vector field on another vector field. We prove a theorem on the representation of the derivative vector as a combination of partial derivatives. As a typical particular case considered vector derivative of the radius vector, generating formalism linking it with the operator nabla. We prove similar theorems for two-dimensional and one-dimensional case. We give examples of applications of these results to problems of mechanics.

**Keywords:** Vector field, the scalar derivative, derivative vector, pointing vector, acceleration, speed.

#### References

1. Popov I.P. *Vestnik Permskogo universiteta. Matematika. Mehanika. Informatika* [Bulletin of Perm University. Mathematics. Mechanics. Computer Science], 2015, no 3(30), pp. 37-39. (In Russ.)
2. Popov I.P. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobscheniya* [The Siberian Transport University Bulletin], 2016, no 1, pp. 32-36. (In Russ.)
3. Popov I.P. *Vestnik Pskovskogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki*, 2015, no 2, pp. 15-18. (In Russ.)
4. Popov I.P. *Matematicheskoe i programmnoe obespechenie v promyshlennoy i sotsialnoy sferah* [Software of System in Industrial and Social Fields], 2015, no 2, pp. 9-12. (In Russ.)
5. Popov I.P. *Inzhenernaya fizika* [Engineering Physics], 2013, no 3, pp 52-56. (In Russ.)
6. Popov I.P. *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Estestvennyye nauki*, 2013, vol. 6, no 3(30), pp. 76-77. (In Russ.)
7. Popov I.P. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 1: Matematika. Fizika*, 2014, no 5 (24), pp. 55-61. (In Russ.)
8. Popov I.P. *Vestnik Pskovskogo gosudarstvennogo universiteta. Estestvennyye i fiziko-matematicheskie nauki*, 2014, vol. 5, pp. 159-172. (In Russ.)
9. Popov I.P. *Vestnik Permskogo universiteta. Matematika. Mehanika. Informatika* [Bulletin of Perm University. Mathematics. Mechanics. Computer Science], 2014, no 3(26), pp. 13-15. (In Russ.)
10. Popov I.P. *Matematicheskoe i programmnoe obespechenie v promyshlennoy i sotsialnoy sferah* [Software of System in Industrial and Social Fields], 2016, vol. 4, no 1, pp. 8-12. (In Russ.)

#### ОБ АВТОРАХ:

**Попов Игорь Павлович** – старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты» Курганского государственного университета. E-mail: ip.popow@yandex.ru.

#### ОБРАЗЕЦ ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Попов И.П. Скалярная и векторная производные векторных полей и их приложение к задачам механики // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2017. – Т.5. – №1. – С. 2-7.

Popov, I.P. (2017) Scalar and vector derivatives of vector fields and their application to problems of mechanics. Software of systems in the industrial and social fields, 4 (1): 2-7.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СПОСОБА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ РЕЖИМОМ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ АГРЕГАТОВ

*Парсункин Б.Н., Ахметов У.Б., Андреев С.М., Чистяков Д.В.*

**Аннотация.** В работе целью исследования является обеспечение функционирования электродуговых технологических агрегатов, таких как дуговая сталеплавильная печь и агрегат печь-ковш, в энергосберегающем режиме. Авторами предложен энергосберегающий помехоустойчивый способ поискового интеллектуального оптимального управления электрическим режимом для дуговых технологических агрегатов. Способ характеризуется разделением во времени поискового тестирующего воздействия на процесс с последующим формированием рабочего управления по интегральной оценке отклика оптимизируемого процесса на тестирующее воздействие. Для построения нового способа автоматического управления авторами рассмотрены: структура контуров управления электродуговыми технологическими агрегатами, функционирование способа управления энергетическими режимами и результаты моделирования работы способа на примере дуговой электросталеплавильной печи. Помехоустойчивость способа обеспечивается формированием плана тестирующих воздействий в соответствии с уникальными свойствами ортогональной функции Уолша. Использование энергосберегающей систем автоматического управления энергетическими режимами дуговых технологических агрегатов позволяет за счет определения и поддержания максимальной электрической мощности, выделенной в дуге, обеспечить максимальную часовую производительность агрегата и минимальное удельное потребление электрической энергии при минимальной себестоимости готовой продукции, получаемой с применением электродуговых технологических агрегатов.

**Ключевые слова:** мощность, выделяемая в дуге, поисковое и рабочее управляющее воздействие, функция Уолша, интегральная оценка

### Введение

Количество стали, выплавленное в дуговых печах, и объемы конвертерной стали, проходящей обработку в дуговых агрегатах печь-ковш, прогнозируемо увеличивается [1]. При постоянном росте стоимости электрической энергии проблема повышения производительности и энергосбережения при использовании электродуговых технологических агрегатов (ЭТА) становится актуальной и важной. Комплексное решение проблем, направленных на повышение эффективности металлургического производства, выполняется в реальном времени по следующим направлениям: исследование информационных и материальных потоков производства [2-4]; развитие новых математических методов моделирования и прогнозирования [5], развитие методов диагностирования; построение обобщенной методики диагностирования механического и электрического оборудования металлургических агрегатов [6], оптимизации управления энергетическим режимом ЭТА [7].

Электрический режим работы ЭТА характеризуется наличием высокочастотных полей, вызванных стохастическим условием горения дуг переменного тока и интенсивных низкочастотных технологических и производственных возмущений. Сложность практической реализации способа оптимизации управления (СОУ) энергетическим режимом ЭТА обусловлена еще и тем, что в производственных условиях вид и текущие производственные характеристики технологического процесса не определены. В этих условиях для оптимизации управления энергетическим режимом целесообразно использовать поисковый интеллектуальный способ.

Анализ многочисленных результатов исследований энергетических режимов ЭТА позволил установить, что максимальное значение производительности ЭТА, минимальное значение удельных затрат электрической энергии, практически минимальное значение себестоимости процесса достигаются при поддержании максимально возможного значения мощности выделяемой в электрической дуге [7-11]. Зависимость величины мощности, выделяемой в электрической дуге, от тока дуги, определяемого длиной дуги, для выбранной ступени напряжения имеет экстремальный вид (рис. 1). Это является необходимым и достаточным условием для практической реализации оптимального управления энергосберегающим и высокопроизводительным режимом работы ЭТА [7]. В соответствии с полученным практическим опытом наиболее целесообразно для реализации оптимального режима управления энергетическим режимом работы ЭТА использовать двухконтурную структуру управления [7].

## Структура контуров оптимального управления ЭТА

Первый основной стабилизирующий контур, реализованный на базе стабилизирующего программного регулятора типа *ArCOS*, осуществляет быструю, но грубую установку рабочего

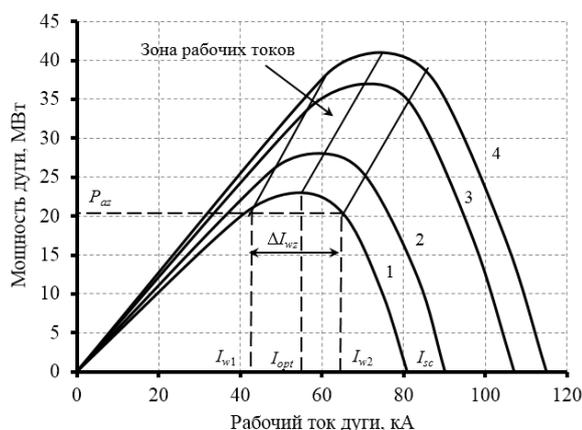


Рис. 1. Расчетные характеристики мощности дуги и зона рекомендуемых рабочих токов для оптимизирующего контура при различных напряжениях печного трансформатора ДСП-180:

1 –  $U = 1045$  В; 2 –  $U = 1155$  В;  
3 –  $U = 1291$  В; 4 –  $U = 1345$  В

тока дуги или положения электрода на границе выделенной зоны работы оптимизирующего контура (см. рис. 1). Расчетные статические характеристики мощности дуги для различных напряжений и выделенная зона работы оптимизирующего контура для различных ступеней напряжения представлены на рис. 1 для одной фазы ДСП-180 электросталеплавильного цеха ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ММК). На рис. 1 введены обозначения:  $I_w$  – рабочий ток дуги, кА;  $I_{opt}$  – оптимальное значений рабочего тока дуги, кА;  $I_{w1}, I_{w2}$  – нижняя и верхняя границы зоны рабочих токов дуги, кА;  $\Delta I_{wz}$  – длина диапазона рабочих токов, кА;  $P_{az}$  – мощность дуги для границ зоны рабочих токов, МВт;  $I_{sc}$  – ток короткого замыкания, кА. Второй корректирующий контур управления обеспечивает медленное, но

точное определение и поддержание максимально возможного значения мощности в выделенной зоне работы.

С точки зрения энергосбережения режим работы в диапазоне  $I_{w1} \leq I_w(\tau) \leq I_{opt}$  более предпочтителен, чем в диапазоне  $I_{opt} \leq I_w(\tau) \leq I_{w2}$  [3].

Система *ArCOS* обеспечивает: программное переключение ступеней печного трансформатора зажигания дуг и ликвидацию технологических коротких замыканий и вывод электрического режима на границу заданной рабочей зоны оптимизирующего контура. При  $I_{w1} = I_{w2}$  или  $\Delta I_w = 0$  функционирует только стабилизирующий контур [3]. Структурная схема реализации энергосберегающего помехозащищенного АОУ энергетическим режимом в ЭТА представлена на рис. 2.

На рис. 2 введены обозначения: ДСП – дуговая сталеплавильная печь; ПТ – печной трансформатор; ПСН – переключатель ступеней напряжения; *ArCOS* – система управления движением электродов; САОУ – система автоматической оптимизации управления;  $K_1, K_2$  – переключающие ключи.

В производственных условиях для функционирования поискового способа оптимизации управления энергетическим режимом ЭТА используются текущие значения величин тока и напряжения каждой из трех фаз. Частота опроса датчиков  $4 \cdot 10^{-4}$  с. Мощность, выделяемая в дуге, вычисляется по формуле:

$$P_a = P_{Ac} - I_w^2 \cdot r, \quad (1)$$

где  $P_a$  – мощность, выделяемая в дуге, МВт;  $P_{Ac}$  – активная мощность фазы дуги, МВт;  $r$  – активное сопротивление, Ом.

Блок управления обеспечивает в зависимости от производственной ситуации целенаправленный выбор режима управления: стабилизирующий или оптимизирующий. Выбор режима осуществляется переключением ключей  $K_1$  и  $K_2$ . При достижении текущим значением тока дуги заданного директивного значения  $I_{w1}$  или  $I_{w2}$  (см. рис. 1) для выбранной ступени напряжения ключом  $K_1$  разрешается работа САОУ и одновременным переключением ключа  $K_2$  осуществляется переключение к управлению электрогидравлической системой перемещения электродов каждой фазы автономно от соответствующей САОУ энергетическим режимом ЭТА. При возникновении нестандартных производственных ситуаций, например технологического короткого замыкания или обрыва дуги, при которых работа САОУ невозможна, управление электродами передается системе *ArCOS*. Система *ArCOS* обеспечивает вывод

режима управления в заданную зону работы САΟΥ. Рекомендуется использовать две скорости перемещения электродов:

- при работе стабилизирующего контура – 120 мм/с;
- при работе оптимизирующего контура – 80 мм/с.

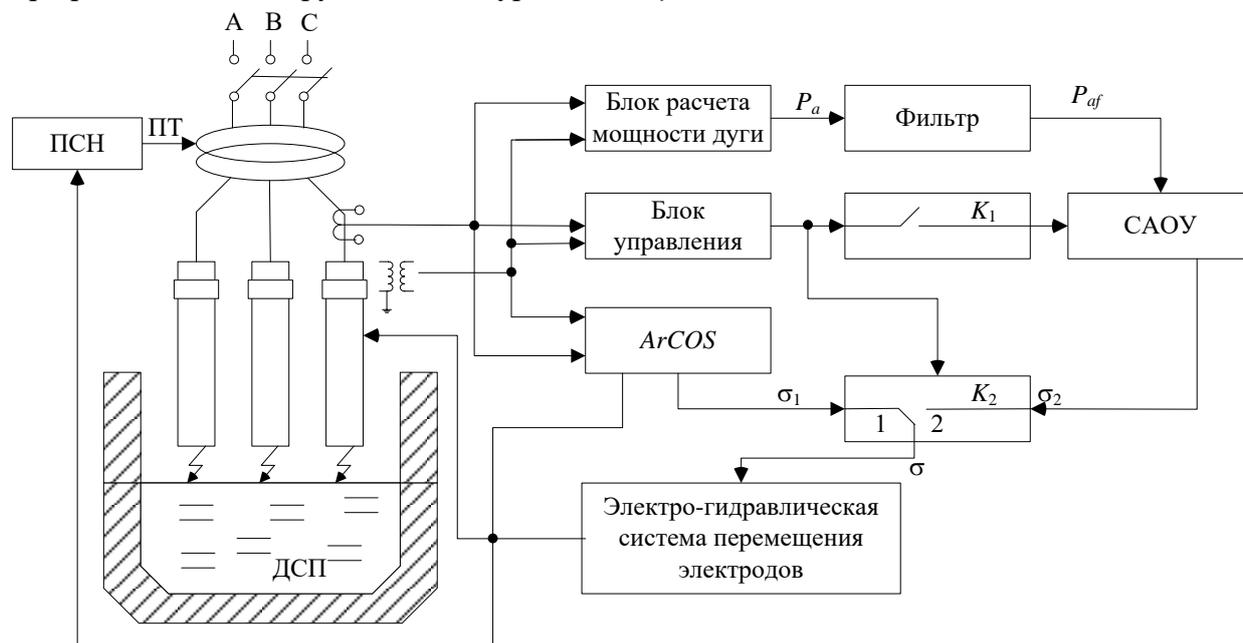


Рис. 2. Структурная схема реализации энергосберегающего оптимального управления электрическим режимом ДСП

### Способ управления энергетическими режимами ЭТА

Существующие способы реализации поискового оптимизирующего режима управления инерционными с запаздыванием процессами характеризуются периодическим предельным изменением управляющего воздействия [12-14]. Это обстоятельство является нежелательным и сдерживающим широкое распространение поисковых САΟΥ. Для устранения отмеченного недостатка в рассматриваемой СОУ использован поисковый способ с разделенным во времени тестирующего и рабочего управляющих воздействий.

Рабочее управляющее воздействие формируется с учетом интегральной оценки реакции оптимизируемого параметра процесса на тестирующее воздействие в соответствии с ортогональной синус-функцией Уолша вида

$$\Psi_n = \prod_{k=1}^{n+1} \text{sign} \sin \frac{2^k \cdot \pi \cdot \tau}{T_{im}}, \quad (2)$$

где  $\Psi_n(\tau)$  – знакопеременная функция;  $T_{im}$  – продолжительность тестирующего воздействия;  $n$  – степень аппроксимирующего полинома действующего технологического возмущения, влияние которого на интегральную оценку отклика оптимизируемого параметра необходимо компенсировать.

Если оптимизируемый энергетический режим характеризуется наличием экстремального вида статической характеристики для мощности дуги и находится в заданной зоне рабочих токов (рис. 1), то при условии отсутствия внешних технологических возмущений ( $n = 0$ ) принцип формирования интегральной оценки реакции оптимизируемого процесса на тестирующее воздействие  $\Psi_0(\tau)$  показан на рис. 3.

Предположим, что оптимизируемый энергетический режим при  $\tau = 0$  находился в точке  $A(I_{wA}; P_{aA})$  и на вход подано управляющее тестирующее воздействие

$$I_w^T(\tau) = I_{wA} + A \cdot \Psi_0(\tau), \quad (3)$$

где  $I_w^T(\tau)$  – поисковое изменение величины тока дуги, вызванное перемещением электрода,  $A$ ;  $A_m$  – амплитуда поискового тестирующего изменения тока,  $A$ ;  $\Psi_0(\tau)$  – значение функции Уолша при  $n = 0$ .

Поисковое тестирующее воздействие вызывает изменение мощности выделяемой в дуге во времени,  $P_a^\Delta(\tau)$ .

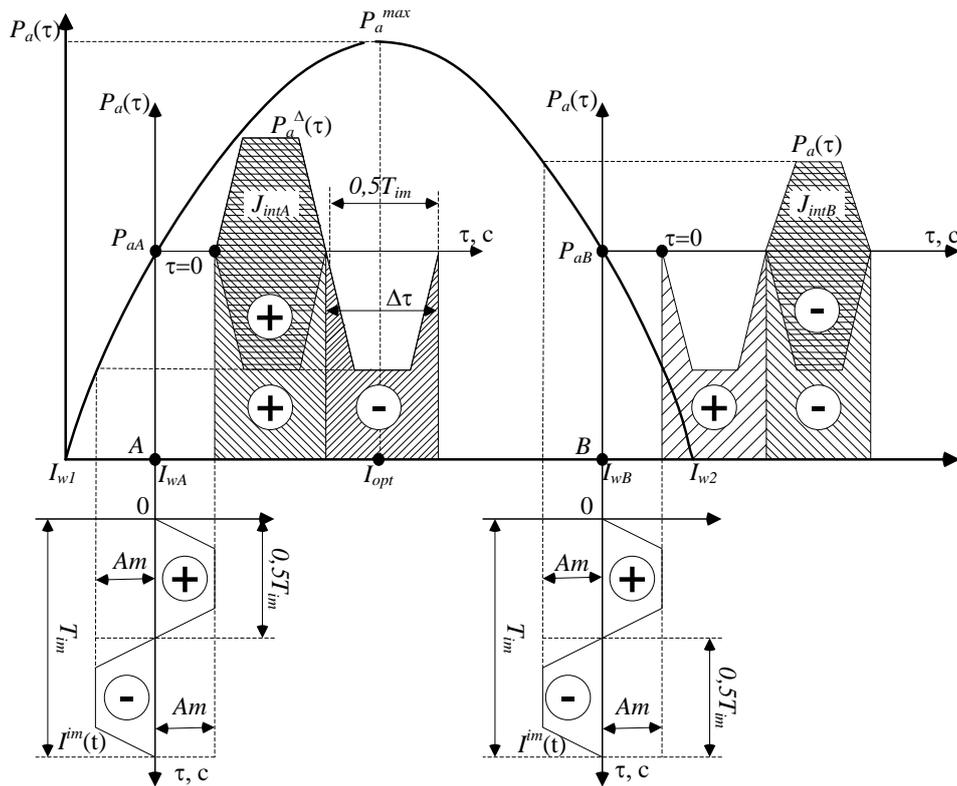


Рис. 3. Принцип формирования интегральной оценки на тестирующее воздействие  $\Psi_0(\tau)$

С момента начала тестирующего воздействия  $\tau = 0$  вычисляется интегральная оценка отклика процесса на тестирующее воздействие в соответствии с выражением

$$J_{int}^A = \int_0^{T_{im}} P_a^\Delta(\tau) \cdot \Psi_0(\tau) d\tau, \quad (4)$$

где  $J_{int}^A$  – определяемая интегральная оценка при  $I_{wA} < I_{opt}$ , а  $J_{int}^B$  – оценка при  $I_{wB} > I_{opt}$ ;  $I_{opt}$  – оптимальное значение тока дуги, при котором обеспечивается значение максимальной мощности  $P_a^{max}(\tau)$  (см. рис. 3).

Следовательно, справедливы условия:

$$\begin{aligned} &\text{если } I_w(\tau = 0) = I_{wA} \leq I_{opt}, \text{ то } J_{int} \geq 0, \\ &\text{если } I_w(\tau = 0) = I_{wB} \geq I_{opt}, \text{ то } J_{int} < 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $J_{int}$  – интегральная оценка;  $I_w(\tau = 0)$  – начальное значение рабочего тока дуги при  $\tau = 0$ .

Знак интегральной оценки определяет начальное значение отклонения управляющего параметра силы тока от текущего оптимального значения. Статическая характеристика ЭТА при переключении ступеней напряжения (см. рис. 1) или ступени реактора, и особенно при различном действии технологических возмущений, смещается и возникает (дрейф). Уникальной отличительной особенностью ортогональной функции Уолша является способность компенсировать влияние различных возмущений на величину интегральной оценки оптимизируемого параметра процесса в соответствии с планом возмущений, формируемых функцией Уолша [1]. В общем случае в зависимости от степени компенсируемого полинома функция Уолша содержит определенное количество равных интервалов времени в соответствии с выражением

$$T_{im} = m \cdot \Delta\tau \text{ и } \Delta\tau = (0,9 \div 1,3)(T_0 + \tau_{lag}), \quad (6)$$

где  $m = 2^{n+1}$  – количество равных интервалов, с;  $\Delta\tau$  – интервал времени, с;  $T_0$  и  $\tau_{lag}$  – соответственно постоянная времени и время запаздывания, характеризующие динамические свойства оптимизируемого процесса, с.

Порядок полинома определяется ориентировочно по экспериментальной траектории изменения мощности дуги на интервале времени  $T_{im}$  по числу экстремумов. Так, в случае монотонного смещения статической характеристики для мощности дуги (см. рис. 1) по сложной траектории  $P_s(\tau) = a_1\tau$ , имеющей вертикальную  $\beta\tau$  и горизонтальную  $\alpha\tau$  составляющие для достоверного определения  $J_{int}$  при  $n = 1$  следует использовать функцию  $\Psi_1(\tau)$ , содержащую четыре отрезка  $\Delta\tau$ :  $\Psi_1(\tau) = \{+1; -1; -1; +1\}$ . Изображение тестирующих функций Уолша представлено на рис. 4. На рис. 5 показан физический принцип компенсации влияния линейного возмущения на интегральную оценку на интервале времени  $T_{im}$ . Функция  $\Psi_n(\tau)$  может быть получена из  $\Psi_{n-1}(\tau)$  с использованием свойств осевой или центральной симметрий в зависимости от степени полинома.

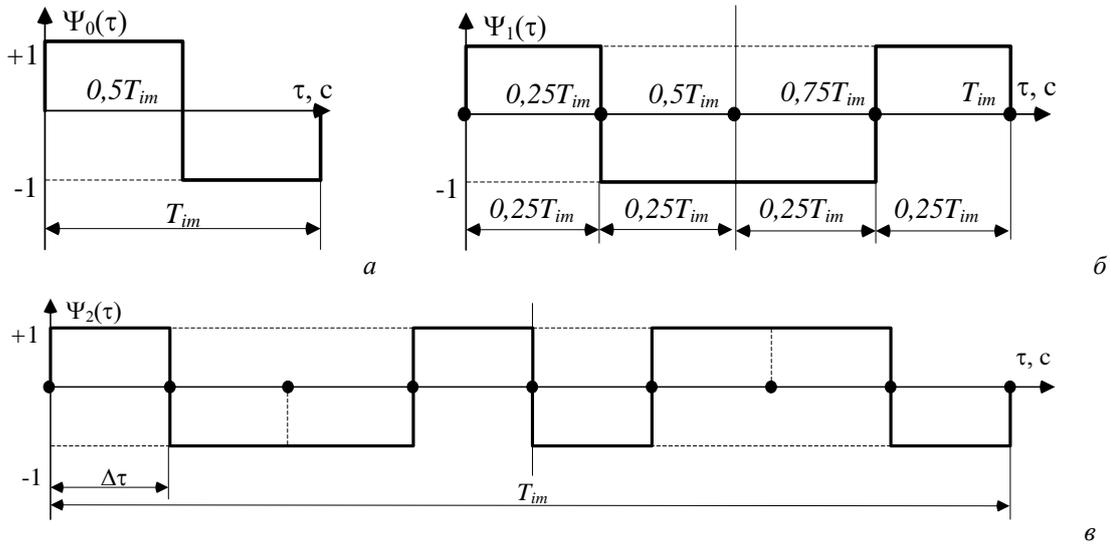


Рис. 4. Изображение тестирующих функций: а –  $\Psi_0(\tau)$ ; б –  $\Psi_1(\tau)$ ; в –  $\Psi_2(\tau)$

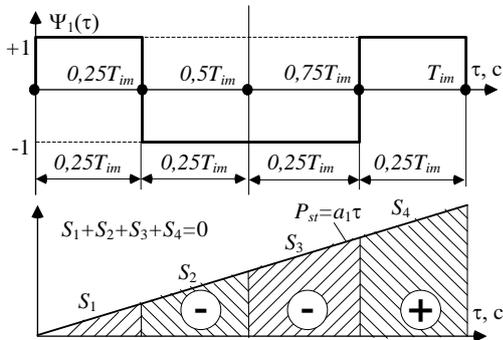


Рис. 5. Принцип компенсации влияния линейного возмущения на интегральную оценку

Использование операции интегрирования при определении интегральной оценки дополнительно снижает погрешность от воздействия высокочастотного сигнала мощности дуги и активной мощности. Если в окрестности экстремума статической характеристики в пределах разрешенной зоны работы оптимизационного контура принять вид статической функции близкий к параболическому, погрешность при этом не превышает 4-5%, то существует пропорциональная зависимость вида

$$J_{int} = K_{pr} (I_{opt} - I_w(\tau)) = K_{pr} \cdot \Delta I_w(\tau), \quad (7)$$

где  $\Delta I_w(\tau) = K_{sp} \cdot \Delta\tau_w$ ;  $K_{sp}$  – скорость перемещения электрода фазы;  $\Delta\tau_w$  – время перемещения электрода для достижения оптимальной силы тока.

Следовательно, при постоянной скорости перемещения электрода для достижения оптимальной силы тока получим

$$\Delta\tau_w = \frac{J_{int}}{K_{pr} \sigma(\tau) K_{sp}}, \quad (8)$$

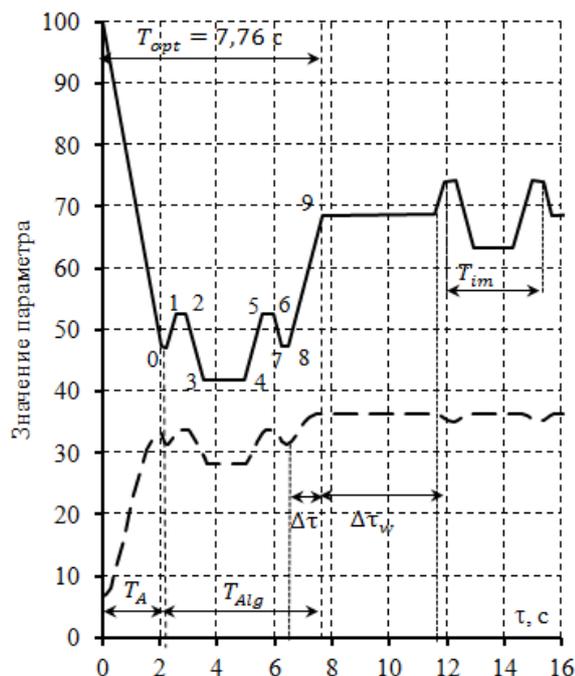
где  $K_{pr}$  – коэффициент пропорциональности, определяемый расчетным или экспериментальным путем, являющийся параметром настройки САОУ для производственного процесса.

### Результаты моделирования

В соответствии с экстремальным видом зависимости для мощности дуги при выбранной ступени напряжения мощность, выделяемая в дуге, определяющая эффективность рабо-

ты ЭТА, достигается при разных рабочих токах  $I_{w1}$  и  $I_{w2}$  (см. рис. 1). Режим работы ЭТА на более коротких, но устойчивых дугах при  $I_{w2}$  является более затратным, но пользуется у технологов большим предпочтением. Поэтому реализация энергосберегающего оптимального режима управление электрическим режимом целесообразна.

В программном обеспечении предусмотрено условие: каждый раз при зажигании дуги при значении тока короткого замыкания стабилизирующий контур переводит режим в зону  $I_{w1} - I_{opt}$  при  $I_{w1}$ . В этом случае поисковый режим САΟΥ в диапазоне  $I_{w1} \leq I_w(\tau) \leq I_{opt}$  обеспечивает эффективное использование подводимой к ЭТА электрической энергии.



— Сила тока, кА — — Мощность дуги, МВт

Рис. 6. Расчетные траектории изменения мощности и силы тока дуги во времени в процессе поискового режима в САΟΥ электрическим режимом при  $U = 1291$  В и  $J_{int} = J_{I_{w1}}$  в ДСП 180

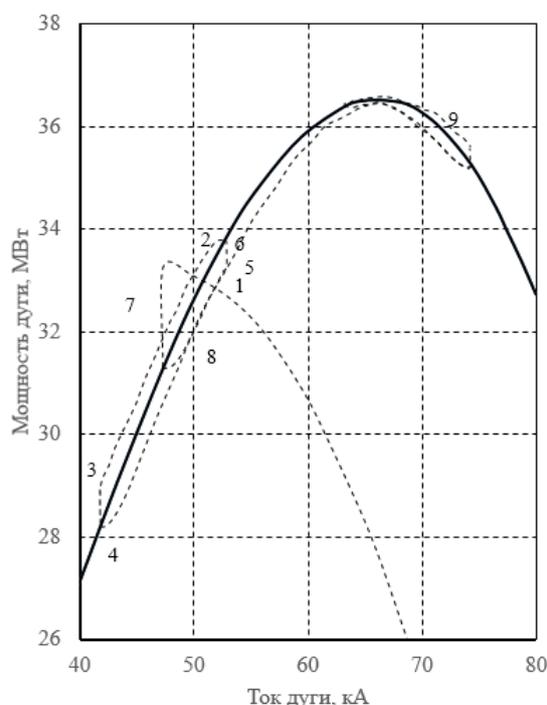


Рис. 7. Траектории поискового процесса функционирования способа динамической коррекции программно-заданного энергетического режима ДСП 180: 1 – траектория изменения текущего значения мощности дуги при работе системы  $ArCOS$  после зажигания дуги; 2 – траектория поискового режима при работе предлагаемого способа

Расчетные траектории изменения мощности и силы тока дуги во времени при использовании предлагаемого способа энергосберегающего оптимального управления электрическим режимом ЭТА для ступени напряжения 1291 В при  $K_{sp} = 17,8 \frac{kA}{c} \left( 80 \frac{mm}{c} \right)$ ;  $A_m = 5,31$  кА;  $T_{im} = 4$  с и при условии обеспечения  $J_{int} = J_{I_{w1}}$  представлены на рис. 6 с момента зажигания дуги для условий работы ДСП 180 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» и на рис. 7 – траектории поискового процесса функционирования способа динамической коррекции программно-заданного энергетического режима ДСП 180.

При функционировании рассматриваемой системы вывод процесса на оптимальный режим обеспечивается с момента зажигания дуги за время  $T_{opt} = 7,76$  с, где время определяется как  $T_{opt} = T_A + T_{Alg}$ ,  $T_A$  – время работы системы  $ArCOS$ ,  $T_{Alg}$  – время работы САΟΥ.

После завершения полного цикла поискового времени воздействия рабочего времени движения электрода в системе предусмотрена временная выдержка перед очередным циклом поиска, если оптимизируемый процесс находится в разрешенной зоне работы САΟΥ.

### Заключение

1. Предложенная двухконтурная система автоматической оптимизации управления энергетическим режимом ЭТА может быть программно без значительных капитальных за-

трат реализована на промышленных печах, в которых использованы микропроцессоры типа SIMATIC или отечественные контроллеры.

2. При исследовании эффективности САОУ на опытном компьютерном стенде система обеспечивает снижение удельных затрат электрической энергии на  $1,5 \div 2\%$  за счет рационального управления электрическим режимом ЭТА.

3. Использование энергосберегающей систем автоматического управления энергетическими режимами позволяет за счет определения и поддержания максимальной электрической мощности, выделенной в дуге, обеспечить максимальную часовую производительность ЭТА и минимальное удельное потребление электрической энергии при минимальной себестоимости готовой продукции, получаемой на ЭТА.

#### Список использованных источников

1. Бигеев, А.М. *Металлургия стали. Теория и технология плавки стали.* / А.М. Бигеев, В.А. Бигеев. – Магнитогорск: МГТУ, 2000. – 544 с.
2. Логунова, О.С. *Технология исследования информационных потоков на металлургическом предприятии* / О.С. Логунова // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2008. – № 3. – С. 32-36.
3. Logunova, O.S. *Automatic system for intelligent support of continuous cast billet production control processes* // O.S. Logunova, I.I. Matsko, I.A. Posohov, S.I. Luk'ynov // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2014. – Т. 74. – № 9-12. – С. 1407-1418.
4. Logunova O.S., Matsko I.I., Posochov I.A. *Integrated system structure of intelligent management support of multi-stage metallurgical processes* // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2013. – № 5 (45). – С. 50-55.
5. *Нечеткое экстремальное управление процессом измельчения руды для обеспечения максимальной производительности* / М.Ю. Рябчиков [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2011. – № 4. – С. 65-69.
6. *Обобщенная методика диагностирования механического и электрического оборудования металлургических агрегатов* / С.И. Лукьянов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2009. – № 1. – С. 38-42.
7. *Парсункин, Б.Н. Автоматизация и оптимизация управления выплавкой стали в электродуговых печах* / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, О.С. Логунова. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ им. Г.И. Носова. 2012. – 312 с.
8. *Ефроймович, Ю.Е. Оптимальные электрические режимы дуговых сталеплавильных печей* / Ю.Е. Ефроймович. – М.: Металлургиздат, 1956. – 108 с.
9. *Марков, Н.А. Электрические цепи и режимы дуговых электропечей* / Н.А. Марков. – М.: Энергия, 1975. – 130 с.
10. *Обработка стали на агрегатах печь-ковш* / Д.А. Дюдкин, С.Ю. Бать, С.Е. Гринберг и др. – Донецк: ООО «Юго-Восток ЛТД», 2003. – 300 с.
11. *Казакевич, В.В. Системы автоматической оптимизации* / В.В. Казакевич, А.Б. Родов. – М.: Энергия, 1997. – 288 с.
12. *Лапшин, И.В. Автоматизация технологических процессов дуговой сталеплавильной печи* / И.В. Лапшин. – М.: МИСиС, 2002. – 157 с.
13. *Анализ различных вариантов построения систем автоматического управления перемещением электродов дуговых сталеплавильных печей и установок ковш-печь* / А.А. Николаев [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2015. – № 2 (50). – С. 90-100.
14. *Ячиков, И.М. Компьютерное моделирование и комплексное изучение свойств и поведения высокотемпературных металлургических расплавов* / И.М. Ячиков, Ю.В. Кочержинская // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2015. – № 2 (7). – С. 2-8.

Материал поступил в редакцию: 12.03.2017

Материал принят к публикации: 25.04.2017

#### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

##### OPTIMAL CONTROL OF ENERGY MODE IN ELECTRIC ARC UNITS

*Parsunkin B.N., Andreev S.M., Ahkmetov U.B., Chistyakov D.V.*

**Abstract:** The purpose of the study is to ensure the functioning of the electric arc technological units, such as an electric arc furnace and a ladle furnace in a power saving mode. The authors propose an energy-saving noise-immune method of search the intelligent optimal control of the electrical mode for arc technological units. The method is characterized by division in time of searching testing interaction to a process with the subsequent formation of a working control according to the integral evaluation of the response of the optimized process to the testing action. For the construction of a new automatic control method, the authors review: the structure of control loops for electric arc technological units, the functioning of the method for controlling energy regimes, and the results of method modeling on the example of electric arc furnace. The noise immunity of the method is provided by forming a plan of testing actions in accordance with the

unique properties of the orthogonal Walsh function. Using the energy-saving systems for automatic control of energy modes of arc technological units makes it possible to ensure the maximum hourly capacity of the unit by determining and maintaining the maximum electric power allocated in the arc and to ensure the minimum consumption of electric energy with the minimum cost of finished products, which are obtained using electric arc process units.

**Keywords:** Power is generated in the arc; search and operating control; Walsh function; integrated assessment.

### References

1. Bigeev A.M. *Metallurgiya stali. Teoriya i tehnologiya plavki stali*. Magnitogorsk: MGTU, 2000, 544 p. (In Russ.)
2. Logunova O.S. *Informatsionnyie tehnologii v proektirovani i proizvodstve*, 2008, no 3, pp. 32-36. (In Russ.)
3. Logunova O.S. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, vol. 74, no 9-12, pp. 1407-1418.
4. Logunova O.S. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2013, no 5 (45), pp. 50-55. (In Russ.)
5. M.Yu. Ryabchikov [end ets.]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2011, no 4, pp. 65-69. (In Russ.)
6. Lukyanov S.I. [end ets.]. *Izvestiya vysshih uchebnyih zavedeniy. Elektromehhanika*, 2009, no 1, pp. 38-42. (In Russ.)
7. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Logunova O.S. *Avtomatizatsiya i optimizatsiya upravleniya vyiplavkoy stali v elektrodugovyih pechah*. Magnitogorsk: Iz-vo MGTU im. G.I. Nosova, 2012, 312 p. (In Russ.)
8. Efroyimovich Yu.E. *Optimalnyie elektricheskie rezhimy dugovyih staleplavilnyih pechey*. Moscow: Metallurgizdat, 1956, 108 p. (In Russ.)
9. Markov N.A. *Elektricheskie tsepi i rezhimy dugovyih elektropechey*. Moscow: Energiya, 1975, 130 p. (In Russ.)
10. Dyudkin D.A., Bat S.Yu., Grinberg S.E. i dr. *Obrabotka stali na agregatah pechkovsh*. Donetsk: ООО «Yugo-Vostok LTD», 2003, 300 p. (In Russ.)
11. Kazakevich V.V. *Sistemy avtomaticheskoy optimizatsii*. Moscow: Energiya, 1997, 288 p. (In Russ.)
12. Lapshin I.V. *Avtomatizatsiya tehnologicheskikh protsessov dugovoy staleplavilnoy pechi*. Moscow: MISiS, 2002, 157 p. (In Russ.)
13. Nikolaev A.A. [end ets.] *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2015, no 2 (50), p. 90-100. (In Russ.)
14. Yachikov I.M., Kocherzhinskaya Yu.V. *Matematicheskoe i programnoe obespechenie sistem v promyshlennoy i sotsialnoy sferah* [Software of systems in the industrial and social fields], 2015, no 2 (7), p. 2-8. (In Russ.)

### ОБ АВТОРАХ:

**Парсункин Борис Николаевич** – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры автоматизированных систем управления ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**Андреев Сергей Михайлович** – канд. техн. наук, заведующий кафедрой автоматизированных систем управления ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**Ахметов Урал Борисович** – канд. техн. наук, директор ООО «Научно-производственный центр «Урал». E-mail: ural@info-com.ru

**Чистяков Дмитрий Владимирович** – канд. соц. наук, исполнительный директор ЗАО «КонсОМ СКС».

### ОБРАЗЕЦ ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Математическое обеспечение способа оптимального управления энергетическим режимом электродуговых агрегатов / Б.Н. Парсункин, У.Б. Ахметов, С.М. Андреев, Д.В. Чистяков // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2017. – Т.5. – №1. – С. 8-15.

Parsunkin, B.N., Andreev, S.M., Ahmetov, U.B and Chistyakov D.V. (2017) Optimal control of energy mode in electric arc units. Software of systems in the industrial and social fields, 5 (1): 8-15.

## ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕНОСА ЗАРЯДА В МЕТАЛЛЕ ПРИ ЕГО НАГРЕВАНИИ И ДЕФОРМАЦИИ

Дубский Г.А., Егорова Л.Г.

**Аннотация.** Исследования посвящены постановке физико-математической задачи для описания явления переноса заряда и разработке алгоритма для определения потоков заряда и энергии в кристаллических металлах при действии на них тепловых и механических возмущений. В работе предложена физико-математическая модель для расчета изменения удельного электрического сопротивления металла при его нагревании и пластической деформации. В работе описан алгоритм расчета изменения удельного электрического сопротивления металла, рассмотрены и описаны основные механизмы рассеяния электронов проводимости, участвующих в процессе переноса заряда с учетом того, что валентные электроны распределены согласно функции Ферми-Дирака и подчиняются принципу Паули. В основу математической модели заложено кинетическое уравнение Больцмана в  $\tau$  – приближении. В работе теоретически рассчитаны времена релаксации –  $\tau$  для рассмотренных механизмов рассеяния. На основе расчетов получены теоретические формулы для расчета удельных сопротивлений нормального металла в зависимости от его температуры, числа дислокаций и вакансий.

**Ключевые слова:** математическая модель, физическая модель, термодинамическая система, электрическое сопротивление, дислокации, вакансии.

### Введение

Для реализации проблемы, связанной с разработкой высокоинформативного электрического контроля качества металлопродукции, необходимо решить несколько задач. Решение этих задач позволит установить механизмы изменения электрического сопротивления при отклонении равновесной структуры кристалла при действии на него внешних физических полей – температурных, электрических, магнитных, механических и др. Прежде чем формулировать физико-математическую задачу явлений переноса заряда в поликристаллическом металле, представим его физическую модель.

### Модель кристаллического металла

Кристаллический металл представляем моделью, близкой к модели Друде-Лоренца, суть которой состоит в том, что жесткий ионный остов, погруженный в газ слабовзаимодействующих между собой квазисвободных электронов, подчиняющихся принципу Паули.

Для описания свойств металла в данной модели будем считать ее двухкомпонентной термодинамической системой, состоящей из двух подсистем, находящихся в непрерывном взаимодействии между собой. Схема модели представлена на рис. 1.

Для того чтобы перевести физическую модель на язык математики, используемый квантовой статистической физикой, ионный кристаллический остов сопоставим с газом квазичастиц – фононов. Фонон – это квант моды упругих колебаний ионов кристаллического остова.

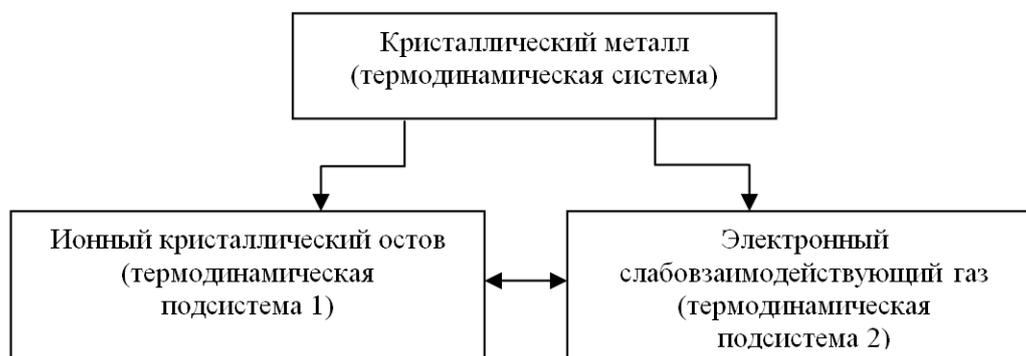


Рис. 1. Схема модели кристаллического металла

Согласно [1] импульс фонона определяется как

$$\vec{p}_\phi = \hbar \vec{k}_\phi, |\vec{k}| = \frac{2\pi}{\lambda_\phi},$$

где  $\lambda_\phi$  – длина волны фонона;  $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34}$  Дж · с – постоянная Планка;  $\vec{k}_\phi$  – волновой вектор;  $\lambda_\phi$  – длина волны фонона.

А энергия

$$E_{\phi} = \hbar\omega_{\phi} = \frac{\hbar^2 |\vec{k}_{\phi}|^2}{2m_{\phi}} = \frac{2\pi\hbar V_{\phi}}{\lambda_{\phi}},$$

где  $\omega_{\phi} = 2\pi\nu_{\phi}$  – циклическая частота фонона;  $V_{\phi}$  – скорость фонона (в изотропном твердом теле равна скорости звука).

Число мод колебаний ионов кристаллического остова равно  $3N$ , где  $N$  – число атомов в кристалле.

Состояние фононного газа и его свойства описываются равновесной функцией распределения Бозе-Эйнштейна:

$$f_0(\varepsilon) = \frac{1}{\exp\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_F}{kT}\right) - 1}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  – энергия фонона в заданном состоянии;  $\varepsilon_F$  – энергия Ферми;  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура.

Любое изменение в кристаллической структуре приводит к изменению равновесной функции распределения (1).

Электронная подсистема, включающая в себя газ квазисвободных электронов проводимости, подчиняющихся принципу Паули, описывается равновесной функцией распределения Ферми-Дирака:

$$f_0(\varepsilon) = \frac{1}{\exp\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_F}{kT}\right) + 1}. \quad (2)$$

Действие на эту подсистему любого физического поля приводит к нарушению равновесности функции (2), а значит, и к изменению состояния подсистемы 2, порождающее перенос заряда и энергии по кристаллическому металлу.

Цель исследования определена как постановка физико-математической задачи для описания явления переноса заряда, разработка алгоритма для определения потоков заряда и энергии в кристаллических металлах при действии на них тепловых и механических возмущений.

### Физико-математическая задача явления переноса заряда

В основу условия задачи положены: кинетическое уравнение Больцмана; виды воздействия на объект контроля; виды рассеяния электронов проводимости: электрон-фононный; электронов на точечных дефектах; рассеяния электронов на дислокациях.

Для наглядного представления физико-математической задачи явления переноса и ее логической последовательности разработана схема реализации задачи, которая представлена на рис. 2. Все шаги, указанные в схеме, представляют собой последовательность расчета потоков электричества и тепла в кристаллических металлах при тепловом и механическом воздействии на них.

### Математическая модель расчета

Кинетическое уравнение Больцмана при удачном его решении позволяет найти неравновесную функцию распределения, а значит, рассчитать плотности переноса потоков электричества и энергии в кристаллическом металле, а введение видов рассеяния электронов устанавливает характер изменения и величину электрического сопротивления.

Математическая задача включает уравнения:

1) уравнение Больцмана

$$\frac{\partial f}{\partial t} + v_i \frac{\partial f}{\partial r_i} + \frac{F_i}{m} \frac{\partial f}{\partial V_i} = \frac{1}{\varepsilon} I(f_0, f), \quad (3)$$

где  $f(\varepsilon, r, t)$  – неравновесная функция распределения;  $F_i$  – сила, действующая на электрон со стороны физического поля;  $V_i$  – скорость электрона;  $m$  – масса электрона;  $r_i$  – координата -го электрона;  $\varepsilon$  – энергия электрона;  $I(f_0, f)$  – интеграл столкновения;  $v_i = V_i$  – скорость электрона;

2) уравнение для  $\tau$  – приближения

$$\frac{1}{\varepsilon} I(f_0, f) = -\frac{f_0 - f}{\tau}, \quad (4)$$

где  $\tau$  – время релаксации неравновесной функции распределения  $f$  к равновесной –  $f_0$ .

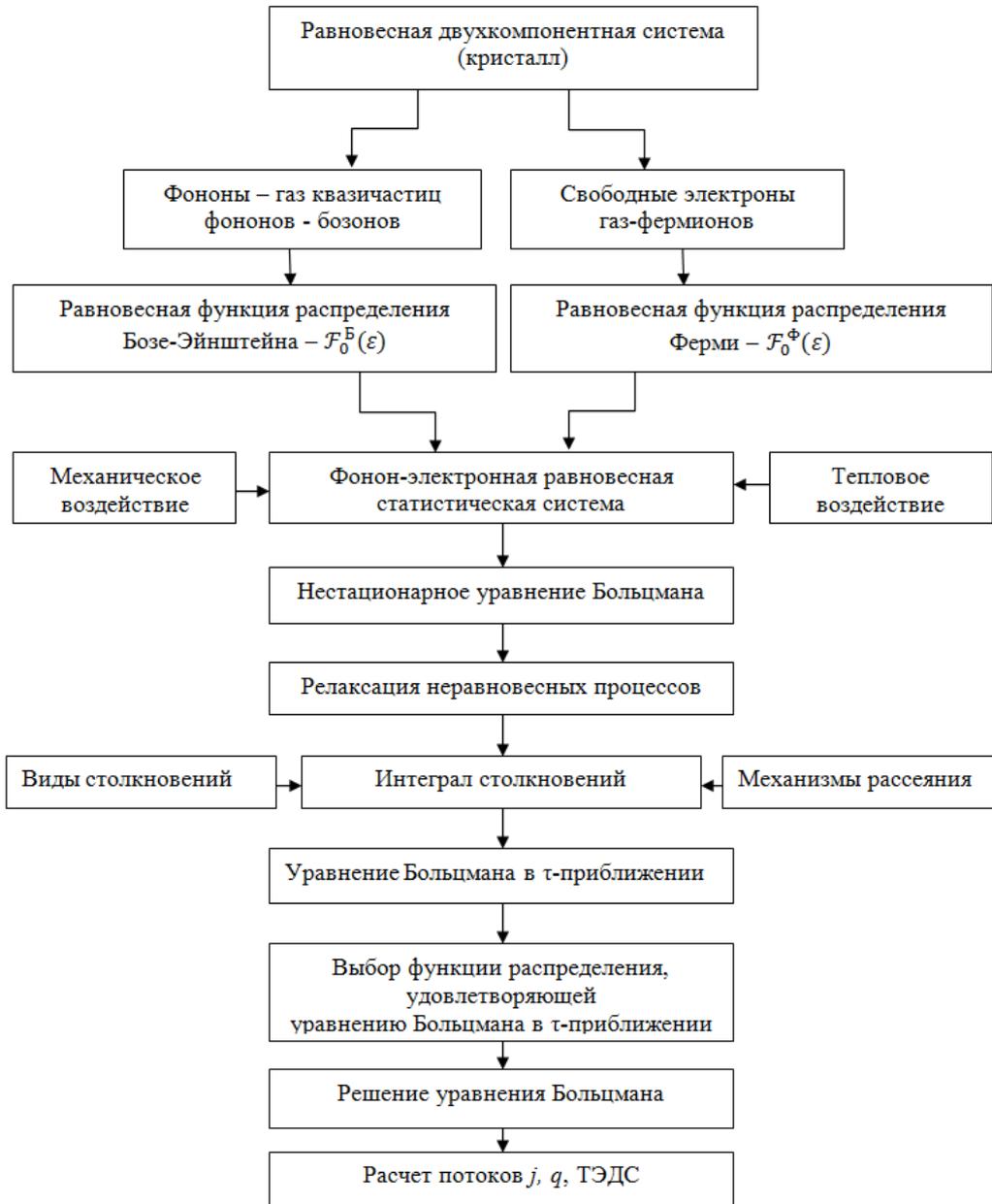


Рис. 2. Схема реализации задачи, связанной с явлениями переноса заряда и энергии

С учетом (3) и (4) получим уравнение Больцмана в  $\tau$ -приближении

$$\frac{\partial f}{\partial t} + v \frac{\partial f}{\partial r} + \frac{F}{m} \frac{\partial f}{\partial V} = -\frac{(f - f_0)}{\tau}. \quad (5)$$

Решение для стационарного случая  $\partial f / \partial t = 0$  представим в виде

$$f(v, r) = f_0(v) - v\Psi(v, r) \frac{\partial f_0}{\partial \varepsilon}, \quad (6)$$

где  $\Psi(v, r)$  выражается в виде ряда по степеням приложенных полей.

В случае наличия только электрического поля напряженностью  $\vec{E}$  и  $grad T$  уравнение (5) принимает вид

$$\frac{e}{\hbar} \vec{E} \nabla_v f + v \nabla_r f = -\frac{f - f_0}{\tau} = \frac{v\Psi(v, r)}{\tau} \frac{\partial f_0}{\partial \varepsilon}, \quad (7)$$

где  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл – заряд электрона.

Подставив (6) в (7) и сохраняя лишь члены первого порядка по электрическому полю, получим:

$$\Psi(v, r) = \tau \left[ e\bar{E} - T\nabla_r \left( \frac{\mu}{T} \right) - \frac{\varepsilon}{T} \nabla_r T \right]. \quad (8)$$

Плотность тока в направлении  $x$  определяется выражением

$$j_x = -\frac{4\pi e}{3} \int_0^\infty \Psi(v_x, x) v_x^4 dv. \quad (9)$$

После интегрирования (9) с учетом (8) получим

$$j_x = \frac{eln_e}{\sqrt{2m\varepsilon_f}} \cdot \frac{\mu}{\varepsilon_f} \left[ \frac{\partial \mu}{\partial x} + eE_x + \frac{\pi^2 k}{3} \cdot \frac{kT}{\mu} \frac{\partial T}{\partial x} \right], \quad (10)$$

где  $l$  – средняя длина свободного пробега электрона проводимости;  $n_e = \frac{n}{V}$  – концентрация электронов в единице объема проводника;  $\varepsilon_f$  – энергия Ферми;  $\mu$  – химический потенциал металла.

При  $grad \mu = 0$  и  $grad T = 0$  плотность тока определяется выражением

$$j = \frac{e^2 ln_e}{\sqrt{2m_e \varepsilon_f}} \cdot E = \sigma E,$$

где  $E$  – напряженность электрического поля,  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг – масса электрона проводимости;  $\sigma$  – проводимость металла посредством электрического поля, вычисляемая по формуле

$$\sigma = \frac{e^2 ln_e}{\sqrt{2m_e \varepsilon_f}}. \quad (11)$$

### Виды столкновений и механизмы рассеяния

Релаксация возмущенных функций распределения Ферми и Бозе происходит за счет непрерывных столкновений электронов с тепловыми колебаниями кристаллической решетки – фононами, точечными дефектами и дислокациями, развивающимися в пластически деформируемых металлах. Будем считать, что эти столкновения могут быть как упругими, так и неупругими, что будет учитываться при описании механизмов рассеяния электронов при расчетах проводимости и теплопроводности.

### Рассеяние электронов на тепловых колебаниях кристаллической решетки (фононах)

Тепловые колебания решетки нарушают совершенную периодичность кристалла. Искаженная решетка рассеивает электроны из одного состояния в другое, например, из состояния с волновым вектором  $\vec{k}$  в состояние с волновым вектором  $\vec{k}'$ . Такое изменение состояния электрона возможно в результате как поглощения, так и испускания фононов при их взаимодействии.

Оператор или интеграл столкновений (3) можно описать посредством процессов рассеяния, при которых электрон переходит из данного состояния  $\vec{k}$  в состояние  $\vec{k}'$  [2]. Обозначим через  $S(\vec{k}, \vec{k}')$  вероятность того, что электрон в единицу времени из-за столкновений перейдет из состояния  $\vec{k}$  в состояние  $\vec{k}'$ . Тогда изменение функции распределения Ферми в результате этих процессов запишется как

$$\left( \frac{\partial f}{\partial t} \right)_{\text{ст}} = \frac{1}{\varepsilon} I(f_0, f) = \int \{ S(\vec{k}', \vec{k}) f(\vec{k}') [1 - f(\vec{k})] - S(\vec{k}, \vec{k}') \cdot f(\vec{k}) [1 - f(\vec{k}')] \} d\vec{k}'. \quad (12)$$

Первый член дает число электронов, которые приходят в состояние  $\vec{k}$  в единицу времени, а второй член – число электронов, которые в процессе столкновений уходят из этого состояния. Произведение  $f(\vec{k}_i) [1 - f(\vec{k}_f)]$  есть вероятность того, что начальное состояние  $\vec{k}_i$  занято, а конечное состояние  $\vec{k}_f$  не занято – условие, которое должно выполняться, если имеет

место рассеяние. Полного решения интегродифференциального уравнения (12) до сих пор получить не удалось.

Однако Дж. Займан, используя множество допущений и предположений, получил следующее решение [2]:

$$\left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{\text{ст}} = k_x \frac{\partial f_0}{\partial \varepsilon} c(\xi) \frac{2}{D\Delta} \varepsilon^{-\frac{3}{2}} \cdot \frac{T}{\theta}, \quad (13)$$

где  $c < 1$  – константа;  $\theta$  – температура Дебая;  $\eta$  – энергия Ферми.

$$D = \left(\frac{3}{4\pi\Omega_0}\right)^{\frac{2}{3}} \frac{\hbar^2}{2m_\phi}; \quad (14)$$

$$\Delta = \left(\frac{m^*}{2}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{4\pi\Omega_0}{3}\right)^{-\frac{1}{3}} \cdot \frac{3\pi^2 g^2 \eta^2}{Mk_0\theta}; \quad \xi = \frac{\varepsilon - \eta}{k_0T},$$

где  $M$  – масса атома кристаллической решетки.

Из вида оператора столкновений (13) следует, что при  $T > \theta$  можно определить время релаксации. Сравнивая (13) с (4), находим:

$$\frac{1}{\tau(\varepsilon)} = \frac{2}{D\Delta} \cdot \varepsilon^{-\frac{3}{2}} \frac{T}{\theta}. \quad (15)$$

Подставив (15) в (11), получим проводимость металла  $\sigma$  для температур  $T > \theta$

$$\sigma = \frac{1}{A} \cdot \frac{\theta}{T}, \quad (16)$$

где

$$A = \frac{27\pi^4 \hbar^4 g^2}{64e^2 \eta^4 \Omega_0 m^* M k_0 \theta}, \quad (17)$$

где  $\Omega_0$  – объем элементарной ячейки, значения параметра  $g$  приведены в таблице.

*Значения параметра  $g$  для одновалентных металлов*

Параметр	Наименование металла							
	<i>Li</i>	<i>Na</i>	<i>K</i>	<i>Rb</i>	<i>Cs</i>	<i>Cu</i>	<i>Ag</i>	<i>Au</i>
<i>g</i>	0,785	0,59	0,605	0,765	0,825	0,94	0,76	1,27

Расчеты значений параметра  $g$  проведены по формулам (16) и (17), используя экспериментальные данные по удельной электропроводимости указанных в таблице металлов. Итак, поглощение или испускание фононов при электрон-фононном взаимодействии приводит к линейной зависимости удельного электросопротивления от температуры, что хорошо согласуется с экспериментальными данными для многих металлов [3].

### Рассеяние электронов проводимости на дефектах Френкеля и Шотки

При температурах образца выше температуры Дебая ( $\theta_\alpha$ ) наряду с рассеянием электронов на фононах возрастает вероятность рассеяния их на вакансиях и межузельных атомах. Релаксация нестационарной функции распределения Ферми на указанных дефектах кристаллической решетки описывается посредством времени релаксации  $\tau$ , являющегося следствием интеграла столкновений. В первом приближении это время определяется так:

$$\tau = \frac{\langle l \rangle}{V_F}, \quad (18)$$

где  $\langle l \rangle$  – средняя длина пробега электрона при взаимодействии с точечным дефектом;  $V_F$  – скорость электрона на поверхности Ферми.

Из квантовой теории проводимости металлов следует, что

$$\sigma = \frac{e^2 n_e}{m_e^*} \cdot \tau = \frac{e^2 n_e}{m_e^*} \cdot \langle l \rangle, \quad (19)$$

где  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл – заряд электрона;  $m_e^*$  – эффективная масса электрона.

Согласно квантовой статистики электронов в металлах [4]

$$\langle l \rangle = \frac{1}{S_d \cdot n_d}, \quad (20)$$

где  $S_d$  – эффективная площадь рассеивающего центра;  $n_d$  – концентрация рассеивающих центров.

Концентрация точечных дефектов по Френкелю и Шоттки в равновесном состоянии при заданной температуре образца

$$n_d = n_0 e^{-\frac{E_d}{kT}}, \quad (21)$$

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/к;  $T$  – абсолютная температура.

Учитывая (19)-(21), получим, что проводимость металла, обусловленная рассеянием на точечных дефектах, имеет вид

$$\frac{1}{\sigma_d} = \rho_d^T = \frac{\sqrt{2m_e^* \varepsilon_f} \cdot S_d n_0}{e^2 \cdot n_e} \cdot \exp\left\{-\frac{E_d}{kT}\right\}. \quad (22)$$

Простой теоретический расчет удельного сопротивления меди по формуле (22) показывает, что добавочное сопротивление, обусловленное рассеянием электронов на точечных дефектах Френкеля и Шоттки, примерно на два порядка меньше, чем сопротивление, обусловленное рассеянием электронов на фононах при одной и той же температуре образца.  $T < \theta_d$  и сравнимо с ним при  $T > 0,8 T_{пл}$ .

### Рассеяние электронов на дислокациях

Как показывает практика, все металлы при механической обработке упрочняются за счет роста числа дислокаций в нем, повышая при этом остаточные напряжения [3]. Пластическая деформация должна приводить к росту электросопротивления металла за счет рассеяния электронов проводимости на дислокациях, число которых увеличивается с ростом деформации.

Увеличение электросопротивления за счет дислокационного рассеяния электронов, как показывают эксперименты [5], от предела пластичности до предела прочности, пропорционально величине деформации, т.е.

$$\rho(\varepsilon) = k \cdot \varepsilon, \quad (23)$$

где  $k = d\rho(\varepsilon)/d\varepsilon$  – постоянный коэффициент.

Пусть необратимое растяжение образца равно  $\Delta l$ , тогда  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$ ,  $l_0$  – исходная длина образца. Но  $\Delta l = b \cdot n_d \cdot S$ , где  $b$  – длина вектора Бюргерса,  $n_d$  – число дислокаций в плоскости скольжения площадью –  $S$ .

Таким образом,

$$\varepsilon = \frac{b \cdot n_d \cdot S}{l_0}. \quad (24)$$

Учитывая (26) и (27), получим:

$$\rho(n_d) = k \cdot \frac{b \cdot n_d \cdot S}{l_0}. \quad (25)$$

Объединяя (18), (19), (27) и (28), получим:

$$\rho(n_d) = \frac{m_e^* V_F}{e^2 \cdot n_e} S_d \cdot n_d. \quad (26)$$

Удельное электросопротивление растет пропорционально росту числа дислокаций в пределах  $\sigma_T < \sigma < \sigma_b$ ; где  $\sigma_T$  – проводимость, обусловленная электрон-фононным рассеиванием,  $\sigma_b$  – проводимость, обусловленная рассеянием электронов на вакансиях, что подтверждается экспериментально [5].

Кроме этого, рост числа дислокаций при пластической деформации порождает «шлейф межузельных атомов», возникающих в результате перемещения дислокаций из одной плоскости скольжения в другую. Это дает дополнительный вклад в электросопротивление. Увеличение числа межузельных атомов происходит за счет того, что при росте деформации включаются новые плоскости скольжения до самых трудных, увеличивая при этом вероятность перемещения дислокаций.

Пусть энергия активации перемещения  $E_v$ . Тогда

$$\rho_v^\sigma = \frac{\sqrt{2m_e^* \varepsilon_f} \cdot S_d n_d \cdot l_d}{e^2 \cdot n_e \cdot a} \cdot \exp\left\{-\frac{E_v}{kT}\right\}. \quad (27)$$

### Заключение

1. Результат решения задачи рассеяния электронов проводимости в простых металлах на фононах при температурах  $T > \theta$  приводит к следующей зависимости удельного электросопротивления  $\rho_\phi$  от температуры:

$$\rho_\phi(T) = \frac{64e^2 \eta^4 \Omega_0 m_e^* M k_0}{27\pi^2 \hbar^4 g^2} \cdot T. \quad (28)$$

2. Учет рассеяния электронов проводимости на дефектах Френкеля и Шоттки дает дополнительный вклад, который рассчитывается по следующей формуле:

$$\rho_d(T) = \frac{\sqrt{2m_e^* \varepsilon_f}}{e^2 \cdot n_e} S_d \cdot n_0 \exp\left\{-\frac{E_a}{kT}\right\}. \quad (29)$$

3. Если при заданной температуре металл подвергается пластической деформации, то наряду с  $\rho_\phi(T)$  и  $\rho_d(T)$  возникают дополнительные вклады, связанные с рассеянием электронов проводимости на дислокациях и межузельных атомах, появляющихся при переползании дислокаций из одной плоскости скольжения в другую. Теоретически полученные расчетные формулы имеют следующий вид:

$$\rho^\varepsilon(n_d) = \frac{m_e^* V_F}{e^2 \cdot n_e} S_d \cdot n_d; \quad (30)$$

$$\rho_d^\sigma = \frac{\sqrt{2m_e^* \varepsilon_f}}{e^2 \cdot n_e} S_d \cdot n_d \frac{l_d}{a} \cdot \exp\left\{-\frac{E_v}{kT}\right\}. \quad (31)$$

Как показывает опыт,  $n_d$  изменяется от  $10^6 \text{ см}^{-2}$  до  $10^{12} \text{ см}^{-2}$ , а  $E_a(\text{Cu}) \approx 0,78 \text{ эВ}$ ,  $E_v = 1,2$ .

### Список использованных источников

1. Харрисон, У. Теория твердого тела / У. Харрисон. – М.: Мир, 1972. – 436 с.
2. Займан, Дж. Принципы теории твердого тела / Дж. Займан. – М.: Мир, 1974. – 423 с.
3. Блатт, Ф.Дж. Термодвижущая сила металлов / Ф.Дж. Блатт. – М.: Металлургия, 1980. – 436 с.
4. Жерифалько, Л. Статистическая теория металлов / Л. Жерифалько. – М.: Мир, 1975. – 382 с.
5. Электростатическое исследование изменения внутренних механических напряжений в металлах / Г.А. Дубский, Т.Я. Дубская, А.А. Нефедьев, И.М. Мингазов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2015. – Т. 3. – №1. – С.149-153.

Материал поступил в редакцию: 12.01.2017

Материал принят к публикации: 01.04.2017

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

**PHYSICAL AND MATHEMATICAL SIMULATION OF CHARGE TRANSFER IN METALS BY HEATING AND DEFORMATION**

*Dubskij G.A., Egorova L.G., Dubskaya T.YA.*

**Abstract.** The investigations are devoted to the formulation of the physical and mathematical problem for describing the charge transport phenomenon and the development of an algorithm for determining the charge and energy fluxes in crystalline metals under the action of thermal and mechanical disturbances on them. The paper presents the physical and mathematical model to calculate a changes in the electrical resistance of the metal while heating and plastic deformation. The paper describes an algorithm for calculating changes in the electrical resistance of the metal. The basic mechanisms of conduction electrons scattering participating in the charge transfer process considering that valence electrons are distributed according to the Fermi-Dirac function and obey the Pauli principle are reviewed in the paper. The mathematical model is based on the Boltzmann kinetic equation in the approximation. The relaxation times are calculated theoretically for the scattering mechanisms. On the basis of calculations, theoretical formulas are obtained for calculating the resistivity of a normal metal as a function of its temperature, the number of dislocations and vacancies.

**Keywords:** Mathematical model, physical model, thermodynamic system, electrical resistance, dislocations, vacancies.

**Referances**

1. Harrison U. *Teoriya tverdogo tela*. Moscow: Mir, 1972, 436 p. (In Russ.)
2. Zayman Dzh. *Printsipyi teorii tverdogo tela*. Moscow: Mir, 1974, 423 p. (In Russ.)
3. Blatt F.Dzh. *Termodvizhushchaya sila metallov*. Moscow: Metallurgiya, 1980, 436 p. (In Russ.)
4. Zherifalko L. *Statisticheskaya teoriya metallov*. Moscow: Mir, 1975, 382 p. (In Russ.)
5. Dubskiy G.A. *Aktualnyie problemyi sovremennoy nauki, tehniki i obrazovaniya*, 2015, vol 3, no 1, pp.149-153. (In Russ.)

**ОБ АВТОРАХ:**

**Дубский Геннадий Алексеевич** – канд .физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры физики ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». E-mail: dubski46@yandex.ru.

**Егорова Людмила Геннадьевна** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры вычислительной техники и программирования ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». E-mail: egorov-lyudmil@yandex.ru.

**ОБРАЗЕЦ ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:**

Дубский Г.А., Егорова Л.Г.. Физико-математическое моделирование процесса переноса заряда в металле при его нагревании и деформации // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2017. – Т.5. – №1. – С. 16-23.

Dubskij, G.A. and L.G. Egorova, (2017) Physical and mathematical simulation of charge transfer in metals by heating and deformation. Software of systems in the industrial and social fields, 5 (1): 16-23.

## О ВЫБОРЕ КРИТЕРИЕВ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ПОДОБИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЗАГРУЗКИ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ЛОМА В РАБОЧЕЕ ПРОСТРАНСТВО ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

*Ошурков В.А., Логунова О.С., Павлов В.В.*

**Аннотация.** Целью исследования является формирование системы критериев подобия для оценки физических форм модельного эксперимента по изучению процесса загрузки шихтовых материалов в дуговую сталеплавильную печь. В качестве объекта исследования выбрана крупнотоннажная дуговая сталеплавильная печь (180 тонн). В качестве предмета исследования используется имитационная модель процесса загрузки шихтовых материалов в дуговую сталеплавильную печь. В данной работе представлено описание системы критериев подобия для оценки физических форм модельного эксперимента по изучению процесса загрузки шихтовых материалов в дуговую сталеплавильную печь. На основании построенной системы критериев подобия приводятся диапазоны соответствия для проведения сравнительного анализа полученных результатов. Анализ проведён на основе модельного эксперимента при подборе элементов подобия для совка, загрузочной бабды, крупнотоннажной дуговой сталеплавильной печи и металлического лома. Исследование проводилось на базе ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова». В качестве методов научного исследования выбраны методы системного анализа, метод конкретизации, методы эмпирического исследования: наблюдение и описание. Результаты исследования предполагаются к использованию для определения прототипов модельных экспериментов для изучения процесса загрузки шихтовых материалов в дуговую сталеплавильную печь путём аппроксимации реальных объектов на наиболее простые и понятные модели.

**Ключевые слова:** Критерии подобия, дуговая сталеплавильная печь, модельный эксперимент, система критериев подобия, электросталеплавильный цех

### Введение

Изучение действующего процесса загрузки шихтовых материалов в дуговую сталеплавильную печь с непосредственным воздействием на технологию в большинстве случаев является невыполнимой задачей по причине многогранности и сложности реальных физических объектов. Проведение натурного эксперимента имеет ограничения, выраженные в отсутствии возможности воздействия на технологию из-за высоких температур материалов и внешней среды [1], трудоемкости и дороговизне процесса. Рационально обоснованным решением данной проблемы является проведение модельного эксперимента [3], в задачи которого входит формирование и управление факторным пространством модели. Подобные исследования являются сложными, но структурированными. Последовательность модельного эксперимента условно делится на два этапа: этап подготовки и этап проведения эксперимента. На первом этапе предполагается сбор исходных данных о реальном объекте и постановка задачи для последующего этапа. Основные шаги первого этапа [2, 4]:

- выбор цели эксперимента;
- определение объекта эксперимента;
- определение предмета эксперимента;
- планирование границ и ограничений эксперимента;
- формирование критериев отбора прототипов эксперимента;
- подбор прототипов модельного эксперимента.

В результате последовательного выполнения шагов первого этапа планируется получение результатов, которые включают [1]:

- систему операций по выполнению модельного эксперимента;
- систему наблюдений и регистрации исследовательских испытаний;
- набор прототипов для исследовательских испытаний.

Наиболее важным в рамках модельного эксперимента является определение параметров реальных физических объектов и формирование критериев для оценки модели. Это позволяет выявить наиболее близкие к оригиналу формы, и от степени проработки шага зависит успешность выполнения исследовательского эксперимента.

Ранее авторами в работе [1] проведены попытки классификации потенциальных параметров и формирования критериев для определения прототипов реальных объектов для изучения процесса загрузки дуговой сталеплавильной печи. В силу схожести процесса загрузки совков металлическим ломом в кислородно-конверторном цехе ПАО «ММК» (ККЦ) с ЭСПЦ ПАО «ММК» и других факторов, ограничивающих возможность изучения ЭСПЦ ОАО

«ММК», параметры и критерии сформированы по изображениям [1], полученным при обследовании процесса загрузки совков шихтовым материалом в ККЦ ОАО «ММК», и по исследованиям [4-13]. В результате дальнейшего исследования получены эмпирические данные по процессу наполнения совков металлическим ломом с последующим кантованием совка в загрузочную бадью для перегрузки лома и заполнением крупнотоннажной дуговой сталеплавильной печи шихтой в ЭСПЦ ОАО «ММК». Это позволило сформировать ряд новых особенностей объектов и стало вызовом для дополнения параметров и критериев определения прототипов реальных физических объектов.

На этом основании сформулирована цель исследования: формирование системы критериев подобия для оценки физических форм модельного эксперимента по изучению процесса загрузки шихтовых материалов в дуговой сталеплавильной печи. В качестве объекта исследования выбрана крупнотоннажная дуговая сталеплавильная печь (180 т). Предмет исследования: имитационная модель процесса загрузки шихтовых материалов в дуговой сталеплавильной печи.

### Система критериев подобия для оценки физических форм модельного эксперимента

Критерии подобия для оценки физических форм модельного эксперимента по изучению процесса загрузки шихтовых материалов в дуговой сталеплавильной печи – совок, загрузочная бадья, рабочее пространство ДСП и металлический лом:

- 1) критерий геометрического подобия совка;
- 2) критерий геометрического подобия загрузочной бадьи;
- 3) критерий геометрического подобия рабочего пространства дуговой сталеплавильной печи;
- 4) критерий геометрического подобия элементов металлического лома.

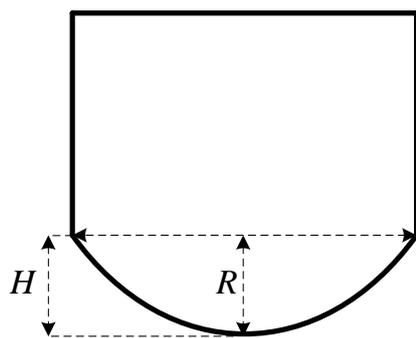


Рис. 1. Проекция загрузочной бадьи

Наблюдение за ходом процесса загрузки шихтовых материалов в дуговой сталеплавильной печи по цепочке «совок – загрузочная бадья – рабочее пространство ДСП» в реальных технологических условиях ЭСПЦ ОАО «ММК» позволило получить данные, на основании которых сделаны выводы о корректности построенных критериев подобия для совка, рабочего пространства печи и металлического лома. Но наблюдение за заполнением загрузочной бадьи выявило дополнительные физические характеристики объекта – лопасти. По этой причине появилась необходимость в учёте пространства в области лопастей при формировании моделей (рис. 1). Таким образом, геометрический критерий подобия загрузочной бадьи ( $Klb$ ), ранее включающий соотношение между высотой ( $Hb$ ) и диаметром ( $Db$ ), дополнен соотношением между радиусом ( $Rbb$ ) и высотой ( $Hbb$ ) лопастей (1):

$$Klb = \frac{Hb}{Db} + \frac{Rbb}{Hbb} \quad (1)$$

На рис. 1 введены обозначения:  $H$  – высота области лопастей, м.;  $R$  – радиус области лопастей, м.

Проведённый анализ и наличие достаточного перечня информативных критериев позволяет установить систему критериев подобия для оценки физических форм модельного эксперимента по изучению процесса загрузки шихтовых материалов в дуговой сталеплавильной печи (рис. 2)

$$\begin{cases} 0,2 \leq Ks \leq 0,3; \\ 2 \leq Klb \leq 2,05; \\ 0,6 \leq Ke \leq 0,65; \\ 10 \leq Kms \leq 45; \\ 3,5 \leq Kms \leq 9,5; \\ 1,5 \leq Kms \leq 3. \end{cases} \quad (2)$$

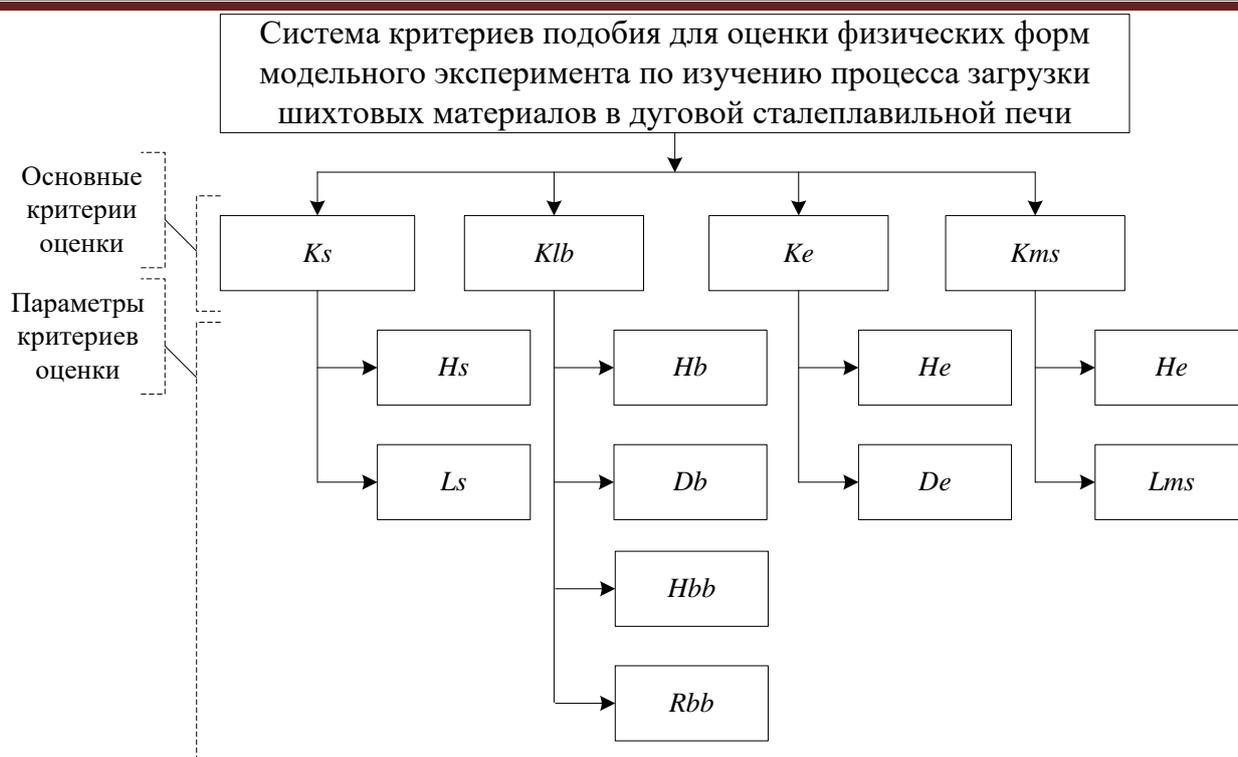


Рис. 2. Схема системы критериев подобия для оценки форм модельного эксперимента по изучению процесса загрузки шихтовых материалов в дуговой сталеплавильной печи

На рис. 2 введены обозначения:  $K_s$  – критерий подобия совка;  $H_s$  – высота совка, м;  $L_s$  – длина совка, м;  $K_{lb}$  – критерий подобия загрузочной бадьи;  $H_b$  – высота загрузочной бадьи, м;  $D_b$  – диаметр загрузочной бадьи, м;  $R_{bb}$  – радиус лопастей, м;  $H_{bb}$  – высота лопастей, м;  $K_e$  – критерий подобия рабочего пространства ДСП;  $H_e$  – высота ДСП, м.;  $D_e$  – диаметр ДСП, м;  $K_{sm}$  – критерий подобия металлического лома;  $L_{ms}$  – длина металлического лома, м.

Описание системы критериев подобия для оценки физических форм модельного эксперимента по изучению процесса загрузки шихтовых материалов в дуговой сталеплавильной печи представлено в табл. 1.

Отклонения значений параметров, представленных в табл. 2, оказывают влияние на результаты исследовательских испытаний, так как полученная модель не будет соответствовать свойствам реального объекта. Это повлечёт расхождения между системой операций исследовательских испытаний и реальным процессом загрузки шихтовых материалов в дуговой сталеплавильной печи. Полученные данные нельзя перенести на реальный процесс. По этой причине разработаны оценки соответствия для проведения сравнительного анализа полученных результатов модельного эксперимента при подборе элементов подобия. Необходимость оценок обуславливает проведение исследовательских испытаний с минимальными погрешностями в результатах (рис. 3).

Оценки соответствия для проведения сравнительного анализа полученных результатов модельного эксперимента при подборе элементов подобия представлены в табл. 2.

Результаты эксперимента при условии, что значения параметра не соответствуют оценкам; фигура «стрелка» синей заливки – влияние на результаты эксперимента при условии, что значения параметра соответствуют оценкам; 1 – прототип несоответствующий оценкам; 2 – прототип соответствующий оценкам; I – прототипы модельного эксперимента; II – примерный результат загрузки моделей металлического лома в прототипы рабочего пространства дуговой сталеплавильной печи, демонстрирующий расхождение результатов; III – влияние на результаты исследовательских испытаний.

Обоснование выбора параметров и критериев подобия

Критерий	Параметр	Описание
Критерий подобия совка ( $K_s$ )	$H_s, L_s$	Совок является источником материала для последующей выплавки жидкой стали. Параметры по высоте ( $H_s$ ) и длине ( $L_s$ ) совка являются важными, так как от них зависит насыпная плотность материала внутри объекта
Критерий физического подобия загрузочной бадьи ( $K_{lb}$ )	$H_b, D_b, R_{bb}, H_{bb}$	Загрузочная бадья является следующим объектом производственного процесса, в который размещается металлический лом после совка. В загрузочной бадье важными параметрами являются: высота ( $H_b$ ), диаметр ( $D_b$ ), высота лопастей ( $R_{bb}$ ) и радиус ( $H_{bb}$ ) лопастей. Эти параметры оказывают влияние на насыпную плотность загружаемого материала
Критерий физического подобия рабочего пространства ДСП ( $K_e$ )	$H_e, D_e$	Рабочее пространство ДСП является конечным местом приёма шихтовых материалов. От расположения материалов в рабочем пространстве печи будет зависеть время нахождения дуги под током и сохранность электродов. По этой причине наиболее важными параметрами являются высота ( $H_e$ ) и диаметр ( $D_e$ ) рабочего пространства печи
Критерий физического подобия металлического лома ( $K_{sm}$ )	$H_e, L_{ms}$	Металлический лом – материал, являющийся основным сырьём для получения жидкой стали после выплавки в ДСП. Размер металлического лома делится на мелкий, средний и негабаритный лом. Размерность материала зависит от длины металлического лома ( $L_{ms}$ ) и высоты рабочего пространства ДСП ( $H_e$ )

Таблица 2

Оценки соответствия для проведения сравнительного анализа полученных результатов модельного эксперимента при подборе элементов подобия

Критерий	Степень соответствия		
	Низкая	Приемлемая	Высокая
$K_s$	0,27 – 0,1	0,29	0,3
$K_{lb}$	1,9 – 0,4 и 2,1 – 3,25	2 – 2,04	2,05
$K_e$	0,6 – 0,28 и 0,66 и выше	0,63 – 0,64	0,65
$K_{sm}$ (мелкий лом)	10 – 43 и 46 и выше	44	От 45 до 10
$K_{sm}$ (средний лом)	4 – 9,5	3,4	От 9,5 до 3,5
$K_{sm}$ (негабаритный лом)	0 – 1,3 и 3,3 – 3,1	3,05	От 3 до 1,5

### Заключение

1. По результатам анализа предметной области – ЭСПЦ ОАО «ММК», в части изучения процесса загрузки шихтовых материалов в дуговой сталеплавильной печи, появилась необходимость в дополнении критерия физического подобия загрузочной бадьи ( $K_{lb}$ ) параметрами высота лопастей ( $H_{bb}$ ) и радиус ( $R_{bb}$ ) лопастей. Эти параметры позволят наиболее полно соответствовать реальному объекту и технологическому процессу.

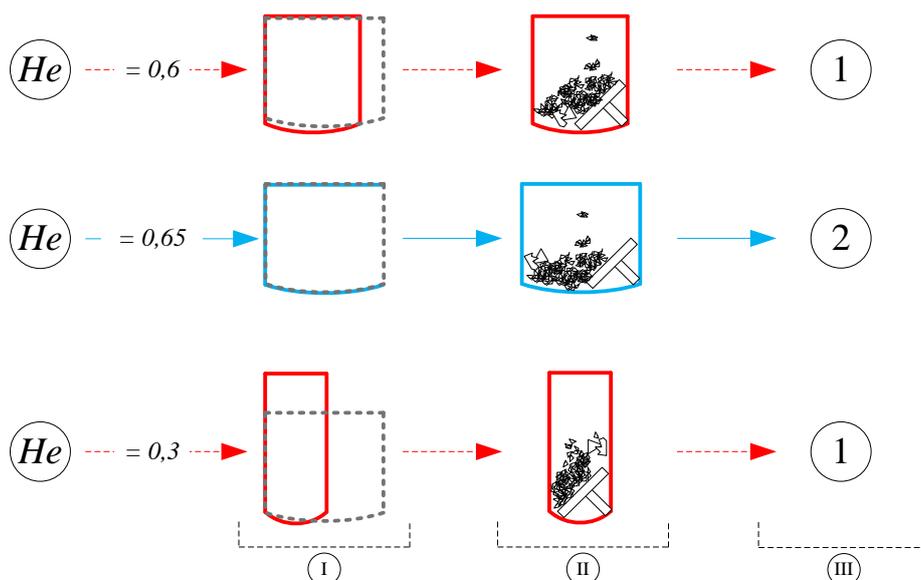


Рис. 3. Схематичное представление отклонения значений параметров от оценок на примере параметра  $He$  критерия  $Ke$

2. Построена система критериев подобия для оценки форм модельного эксперимента. Предложены оценки соответствия для проведения сравнительного анализа полученных результатов модельного эксперимента при подборе элементов подобия для совка, загрузочной бадьи, крупнотоннажной дуговой сталеплавильной печи и металлического лома.

3. Результаты исследования предполагаются к использованию для определения прототипов модельных экспериментов для изучения процесса загрузки шихтовых материалов в дуговую сталеплавильную печь путём аппроксимации реальных объектов на наиболее простые и понятные модели.

#### Список использованных источников

1. Планирование модельных экспериментов для изучения процессов загрузки дуговой сталеплавильной печи / О.С. Логунова [и др.] // Современные тенденции развития науки и технологий. – 2016. – № 12-4. – С. 60-68.
2. Любченко, Е.А. Планирование и организация эксперимента: учебное пособие / Е.А. Любченко, О.А. Чуднова. – Владивосток: Изд-во ТГЭУ, 2010. – 156 с.
3. Наместников, А.М. Разработка имитационных моделей в среде MATLAB: методические указания для студентов специальностей / А.М. Наместников. – Ульяновск, УлГТУ, 2004. – 72 с.
4. Налимов, В.В. Теория эксперимента [Текст] / В.В. Налимов. – М.: Изд-во Наука, 1971. – 201 с.
5. Тихонов, А.И. Основы теории подобия и моделирования: (электрические машины): учебное пособие / А.И. Тихонов. – Иваново: Изд-во ИГЭУ, 2011. – 132 с.
6. Лекции по методам оценивания и выбора моделей [Электронный ресурс] // Forecsys: [сайт]. [2007]. –URL: <http://www.ccas.ru/frc/papers/vo-ron04twim.pdf> (дата обращения: 27.03.2017).
7. Смайлов, С.А. Механика жидкости и газа [Текст]: учебное пособие / С.А. Смайлов, К.А. Кувшинов; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2012. – 121 с.
8. Logunova O.S., Matsko I.I., Posochov I.A. Integrated system structure of intelligent management support of multi-stage metallurgical processes // Vestnik of Nosov Magnitogorsk state technical university. – 2013. – № 5. – P. 50 – 55.
9. Pavlov V.V., Logunova O.S. Charge melting materials selection procedure for EAF to work in power saving mode // World Applied Sciences Journal. – 2014. – Т. 31. – № 8. – P. 1502-1507.
10. Моделирование риска обвалов шихты при загрузке крупногабаритного лома в электродуговую сталеплавильную печь / О.С. Логунова [и др.] // Сталь. – 2012. – № 9. – С. 76-79.
11. Влияние фракционного состава металлолома на показатели работы дуговой сталеплавильной печи / В.В. Павлов [и др.] // Электрометаллургия. – 2011. – № 11. – С. 2-6.
12. Logunova O.S., Pavlov V.V., Matsko I.I., Pavlov I.V. Empirical model of residual element content in steel when three component burden is used in the process of steel production in electric arc furnace // Journal of Mining World Express. – 2012. – Т. 1. – № 1. – P. 21-26.
13. Logunova O.S., Pavlov V.V. Stabilizing the residual contents of elements in steel by using alternative materials in the metallic charge of an arc steelmaking furnace // Metallurgist. – 2014. – Т. 58. – № 3-4. – P. 299-305.

Материал поступил в редакцию: 12.03.2017

Материал принят к публикации: 25.04.2017

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

**ON THE ELECTION OF THE SIMILARITY GEOMETRIC CRITERIA FOR MODELING THE PROCESS OF CHARGE MATERIALS IN AN ELECTRIC ARC FURNACE**

*Oshurkov V.A., Logunova O.S., Pavlov V.V.*

**Abstract.** The aim of this work is to form the system of similarity criteria for evaluating physical forms of model experiments to study the electric arc furnace charging process. The object of research is large-capacity electric arc furnace (180 ton). The subject of research is the simulation model of the charging process in the electric arc furnace. This paper presents the description of similarity criteria system for evaluating the physical forms of model experiments to study the charging process of electric arc furnace. According to the proposed the system the description of conformance evaluation benchmarking analysis of model experiments in the charging was carried out to get the results for scoop, loading bucket, large-capacity electric arc furnace and scrap. Location of research: Nosov Magnitogorsk State Technical University. Methods of research: methods of system analysis, method concretism, methods of empirical research i.e. observation and description. Results of the research are assumed to be used in process of determination model experiments prototypes. It is performed to study the charging process of electric arc furnace by method of approximation of the physical objects.

**Keywords:** Similarity criteria, electric arc furnace, model experiment, system of similarity criteria, meltshop

**References**

1. Logunova O.S. [i dr.] *Sovremennyye tendentsii razvitiya nauki i tekhnologii*, 2016, no 12-4, pp. 60-68. (In Russ.)
2. Lyubchenko E.A., Chudnova O.A. *Planirovanie i organizatsiya eksperimenta*. Vladivostok: TGEU, 2010, 156 p. (In Russ.)
3. Namestnikov A.M. *Razrabotka imitatsionnykh modeley v srede MATLAB*. Ulyanovsk: UIGTU, 2004, 72 p. (In Russ.)
4. Nalimov V.V. *Teoriya eksperimenta*. Moscow: Nauka, 1971, 201 p. (In Russ.)
5. Tihonov, A.I. *Osnovnyy teorii podobiya i modelirovaniya*. Ivanovo: IGEU, 2011, 132 p. (In Russ.)
6. *Leksii po metodam otsenivaniya i vyibora modeley*. Available at: <http://www.ccas.ru/frc/papers/vo-ron04twim.pdf> (Accessed Mart 27, 2017).
7. Smaylov S.A., Kuvshinov K.A. *Mehanika zhidkosti i gaza*. Tomskiy politehnicheskii universitet.
8. Logunova O.S., Matsko I.I., Posochov I.A. Integrated system structure of intelligent management support of multi-stage metallurgical processes. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk state technical university*, 2013, no 5, p. 50 – 55. (In Russ.)
9. Pavlov V.V., Logunova O.S. *World Applied Sciences Journal*, 2014, vol. 31, no 8, pp. 1502-1507.
10. Logunova O.S. [and ets.]. *Stal*, 2012, no 9, p. 76-79.
11. Pavlov V.V. [and ets.]. *Elektrometallurgiya*, 2011, no 11, p. 2-6. (In Russ.)
12. Logunova O.S., Pavlov V.V., Matsko I.I., Pavlov I.V. Empirical model of residual element content in steel when three component burden is used in the process of steel production in electric arc furnace. *Journal of Mining World Express*, 2012, vol. 1, no 1, p. 21-26.
13. Logunova O.S., Pavlov V.V. Stabilizing the residual contents of elements in steel by using alternative materials in the metallic charge of an arc steelmaking furnace. *Metallurgist*, 2014, vol. 58, no 3-4, p. 299-305. (In Russ.)

**ОБ АВТОРАХ:**

**Ошурков Вячеслав Александрович** – аспирант кафедры вычислительной техники и программирования, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова». E-mail: oshurkov92@mail.ru.

**Логунова Оксана Сергеевна** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой вычислительной техники и программирования ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. И. Г. Носова». E-mail: logunova66@mail.ru.

**Павлов Владимир Викторович** – ведущий инженер-технолог электросталеплавильной лаборатории научно-технического центра ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». E-mail: pavlov.vv@mmk.ru.

**ОБРАЗЕЦ ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:**

Ошурков В.А., Логунова О.С., Павлов В.В. О выборе критериев геометрического подобия для моделирования процесса загрузки металлического лома в рабочее пространство дуговой сталеплавильной печи // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2017. – Т.5. – №1. – С. 24-30.

Oshurkov, V.A., Logunova, O.S. and Pavlov V.V. (2017) On the election of the similarity geometric criteria for modeling the process of charge materials in an electric arc furnace. *Software of systems in the industrial and social fields*, 5 (1): 24-30.

## ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМ

## SOFTWARE SYSTEMS

УДК 658.58

**МОБИЛЬНОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА  
ОБОРУДОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ:  
ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И ВНЕДРЕНИЯ***Бовшик П.А., Берляков Е.В., Ахметшин И.Н., Логунов С.М.*

**Аннотация.** В работе представлен опыт разработки и внедрения мобильной платформы автоматизированной системы управления техническим обслуживанием и ремонтами оборудования для промышленного предприятия. Целью создания проекта является: повышение ресурсоемкости оборудования сортового и агломерационного цехов на основе получения оперативной информации за счет оперативного выявления дефектов оборудования, гибкого планирования графика устранения дефектов оборудования и своевременного устранения выявленных дефектов оборудования. В качестве функции мобильной платформы автоматизированной системы управления техническим обслуживанием и ремонтами оборудования определены: контроль перемещения персонала по территории цеха во время обхода оборудования; генерация отчетной документации о выполненных работах; контроль трудозатрат в реальном времени. Основу аппаратного обеспечения мобильной платформы автоматизированной системы управления техническим обслуживанием и ремонтами оборудования составляет устройство *Symbol TC70*. Отмечены перспективные направления развития системы. Мобильная платформа автоматизированной системы управления техническим обслуживанием и ремонтами оборудования для промышленного предприятия ООО «Объединенная сервисная компания», г. Магнитогорск. Полное внедрение системы с охватом более 35000 объектов учета по оборудованию двух основных цехов ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» запланировано в 2018 году.

**Ключевые слова:** оборудование, ремонт оборудования, техническое обслуживание оборудования, мобильное приложение, программная реализация.

**Введение**

Современные промышленные производства и предприятия оснащаются оборудованием, которое требует сплошного мониторинга состояния и оперативного принятия решения о необходимости технического обслуживания и ремонтов. В настоящее время проблемам организации технического обслуживания и ремонтами посвящено множество работ по нескольким направлениям. Анализ новых подходов к техническому обслуживанию и ремонту технологического оборудования выполнен в работах для предприятий атомной энергетики [1], авиационных компаний [2], газовой и нефтяной промышленности [3-5]. Активно изучаются вопросы, связанные с организацией информационного обеспечения систем и автоматизации процессов управления техническим обслуживанием и ремонтами оборудования [6, 7]. В частности, в работе [7] рассматриваются результаты исследований эффективности автоматизации работ по ремонту и техническому обслуживанию. Произведен поиск и обобщение показателей эффективности технического обслуживания и ремонта, источники и состав исследованной информации. Работа является попыткой обобщения разрозненной информации по эффективности применения систем технического обслуживания и ремонтов оборудования. В качестве источников информации авторы [7] использовали материалы аналитических агентств *Gartner*, *A.T. Kearney*, *ARC Advisory Group*, *SMRP*.

Для оценки эффективности действующих систем авторы работ [7, 8] вводят ключевыми показателями эффективности КПЭ (*KPI*, *Key Performance Indicators*), которые позволяют оценить эффективность процессов планирования ремонтов и их выполнения, статистику неисправностей оборудования, эффективность использования оборудования, эффективность деятельности вспомогательных ремонтных подразделений предприятия.

В основу разрабатываемых автоматизированных систем управления техническим обслуживанием и ремонтами закладываются математические основы составления оперативных и перспективных планов [9]. Основными методами при изучении текущего состояния объектов являются методы системного анализа и перспективное развитие прогнозируется на основе методов интеллектуальной поддержки принятия решений [9-12].

Крупные металлургические предприятия эксплуатируют высокотехнологичное оборудование и, как правило, его обслуживание передается на аутсорсинг. Два основных производственных цеха крупного металлургического предприятия России ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» в рамках пилотного проекта для проектирования, разработки и внедрения автоматизированной системы управления техническим обслуживанием и ремонтом оборудования работы переданы ООО «Объединенная сервисная компания». В качестве основных цехов выбраны:

- сортовой цех, в состав которого входят: сортовой стан 450 производительностью до 790 тыс. т в год, предназначенный для прокатки уголка, швеллера, круга в прутках, полос; мелкосортный стан 370 мощностью 585 тыс. т, производящий арматурный прутки и круг диаметром до 50 мм, квадрат, шестигранник; мелкосортно-проволочный стан 170 производительностью 765 тыс. т в год;
- агломерационный цех, выполняющий подготовку сырья для выплавки стали с объемом выпуска агломерата 11 млн т в год.

В сортовом цехе эксплуатируется 16500 единиц оборудования и 17500 – в агломерационном цехе. Кроме большого количества технологического оборудования, объекты мониторинга распределены на широком пространстве. Ведение мониторинга и учета в условиях пространственно распределенного оборудования вызывает затруднения при использовании стационарных автоматизированных систем управления техническим обслуживанием и ремонтами оборудования.

С 2008 года эксплуатируется стационарная автоматизированная система управления, предназначенная для автоматизации и информационного обеспечения работ по техническому обслуживанию и ремонтам оборудования. В систему внесена информация об активах, регламенте их обслуживания, документация, автоматически рассчитывается график обслуживания. Персонал вносит информацию о выполнении работ, о затраченных материально-технических ресурсах, требуемые документы, информацию. При обнаружении нештатных ситуаций в автоматизированную систему вносится информация о дефектах, отказах и простоях оборудования, которая анализируется рабочими и сотрудниками ремонтных служб.

В 2016 году принято решение о создании проекта «Мобильная платформа автоматизированной системы управления техническим обслуживанием и ремонтами». Целью проекта является: *повышение ресурсоемкости оборудования сортового и агломерационного цехов на основе получения оперативной информации за счет оперативного выявления дефектов оборудования, гибкого планирования графика устранения дефектов оборудования и своевременного устранения выявленных дефектов оборудования.*

Для достижения цели определены задачи проекта:

- разработка мобильного программного модуля для загрузки заданий исполнителям и регистрации выполнения задания согласно графику;
- разработка программного модуля для идентификация оборудования по зонам на основе NFC-меток;
- разработка программного модуля для контроля выполнения работ по местоположению и фотографии оборудования;
- формирование базы данных на основе оперативной информации о дефектах оборудования с описанием и фотографией;
- разработка информационного обеспечения для мобильной справочной документация по эксплуатации автоматизированной системы управления техническим обслуживанием и ремонтами.

Проект «Мобильная платформа автоматизированной системы управления техническим обслуживанием и ремонтами» обладает преимуществами, приведенными на рис. 1, перед функционирующей стационарной платформой.



Рис. 1. Преимущества мобильной платформы автоматизированной системы управления техническим обслуживанием и ремонтами

Определены этапы разработки и внедрения автоматизированной мобильной системы управления техническим обслуживанием и ремонтами: этап проектирования – первое полугодие 2016 года; разработка пилотного проекта – второе полугодие 2016 года; начало внедрения – ноябрь 2016 года; активное тестирование и внедрение – 2017 год; внедрение на все объекты по управления техническому обслуживанию и ремонтам – 2018 год.

### Функции и структура «Мобильная АСУ ТО и Р»

В качестве функций мобильной платформы автоматизированной системы управления техническим обслуживанием и ремонтами оборудования определены: контроль перемещения персонала по территории цеха во время обхода оборудования; генерация отчетной документации о выполненных работах; контроль трудозатрат в реальном времени. Для осуществления функций мобильной платформы автоматизированной системы управления техническим обслуживанием и ремонтами оборудования разработана структура обмена данными (рис. 2).



Рис. 2. Структура обмена данными

Одним из источников информации о состоянии оборудования являются фотографии, которые отправляются в стационарную систему для рассмотрения оценки экспертами. Примеры фотографий оборудования представлены на рис. 3.



Рис. 3. Примеры фотографий дефектов оборудования для оценки состояния

Для идентификации оборудования установлены NFC-метки и произведено разбиение рабочего пространства на зоны (рис. 4).

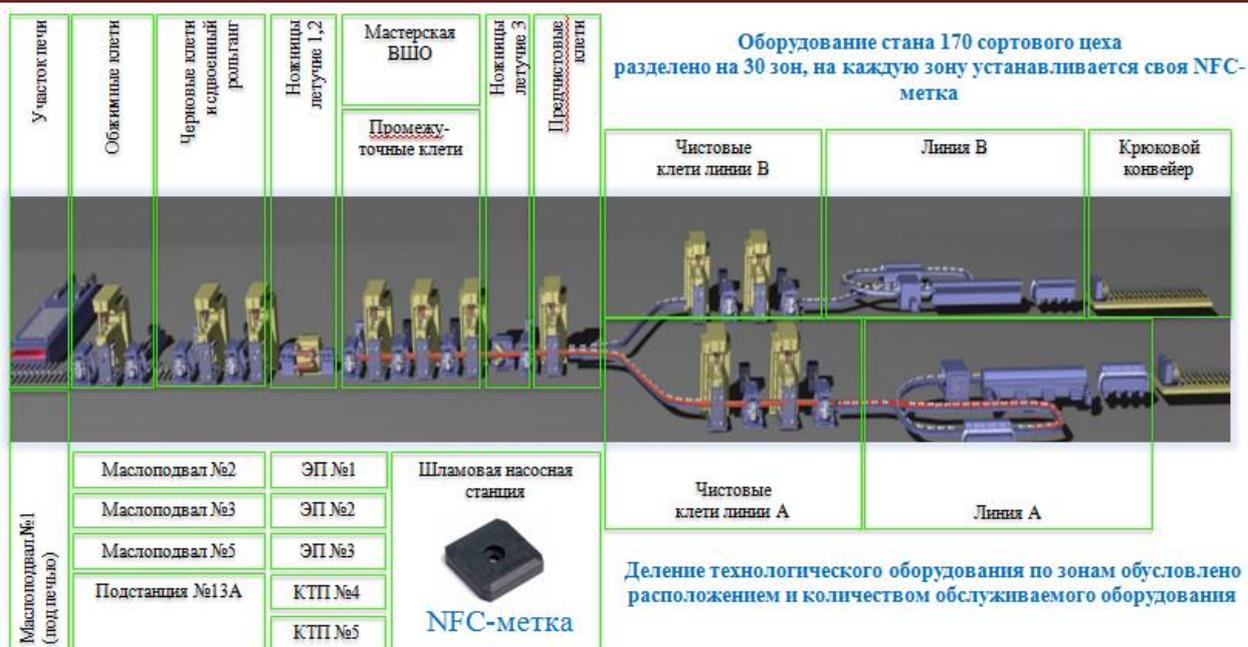


Рис. 4. Пример разбиения рабочего пространства стана 179 сортового цеха на зоны по NFC меткам

### Аппаратное обеспечение мобильной платформы автоматизированной системы управления техническим обслуживанием и ремонтами оборудования



Рис. 5. Устройство Symbol TC70

Основу аппаратного обеспечения мобильной платформы автоматизированной системы управления техническим обслуживанием и ремонтами оборудования составляет устройство *Symbol TC70* (рис. 5). Технические характеристики устройства приведены в таблице.

*Symbol TC70* – производственные мобильные компьютеры для корпоративных пользователей, выпускаемые компанией *Zebra Technologies*, которые обеспечивают доступ к информации в режиме реального времени и позволяют наладить взаимодействие между персоналом. Мобильный компьютер *Symbol TC70* представляет собой многофункциональное устройство, удобное в эксплуатации, как и обычный смартфон (компьютер имеет аналогичный форм-фактор). Он работает на базе ОС *Android*, которую за счет расширения *Mobility Extensions* можно превратить в опера-

ционную систему корпоративного класса. *Symbol TC70* оснащен сканером сбора данных, который позволяет эффективно считывать разные типы штриховых кодов. Дополняет сканер 8-мегапиксельная камера, работающая в режиме съемки фото и видео. Технология *NFC*, встроенная в *Symbol TC70*, дает возможность организовать контроль допуска в здания, а программа передачи голоса *Workforce Connect Push – To – Talk* наделяет компьютер функциями рации и беспроводного телефона.

Одного нажатия кнопки достаточно, чтобы получить доступ к любой информации на сервере предприятия в режиме реального времени: к штрих-кодам, видеофайлам, фотографиям, меткам, данным любого документа. Также просто связываться с другими сотрудниками предприятия: и теми, что находятся на выезде, и теми, что сидят в офисе.

*Symbol TC70* поставляется в прочном и надежном корпусе, который защищает аппаратную «начинку» компьютера от воздействий извне и гарантирует исправную работу.

Технические характеристики Symbol TC70

Параметр	Symbol TC70	Параметр	Symbol TC70
Длина (мм)	161	Процессор (МГц)	1,7
Ширина (мм)	84	Оперативная память (ГБ)	1
Толщина (мм)	28	Камера (Мпикс)	8 (автофокус)
Вес (г)	376	Наличие вспышки	+
Материал корпуса	пластик	Датчик движения	3-х осевой
Размер дисплея (дюйм)	4,7	GSM модуль	-
Разрешение дисплея	1280x720	Bluetooth	v4.0 Smart
Работа в перчатках	рука/перчатка/стилус	WiFi	2.4/5 ГГц a/b/g/n (Cisco CCXv4)
Батарея (мАч)	4620	NFC	+
Защита	IP67	IP Телефония	+
Температура рабочая (гр.)	-20...50	Рация	WiFi
Операционная система	Android AOSP 4.4.2	GPS (ГЛОНАСС)	-
Процессор (кол-во ядер)	2		

**Интерфейсные решения мобильной платформы автоматизированной системы управления техническим обслуживанием и ремонтами оборудования**

Интерфейс программного обеспечения мобильной платформы автоматизированной системы управления техническим обслуживанием и ремонтами оборудования реализован на основе главного меню, имеющей иерархическую структуру. Главное меню охватывает все функциональные возможности системы. На рис. 6 приведен вид нескольких рабочих окон мобильной платформы

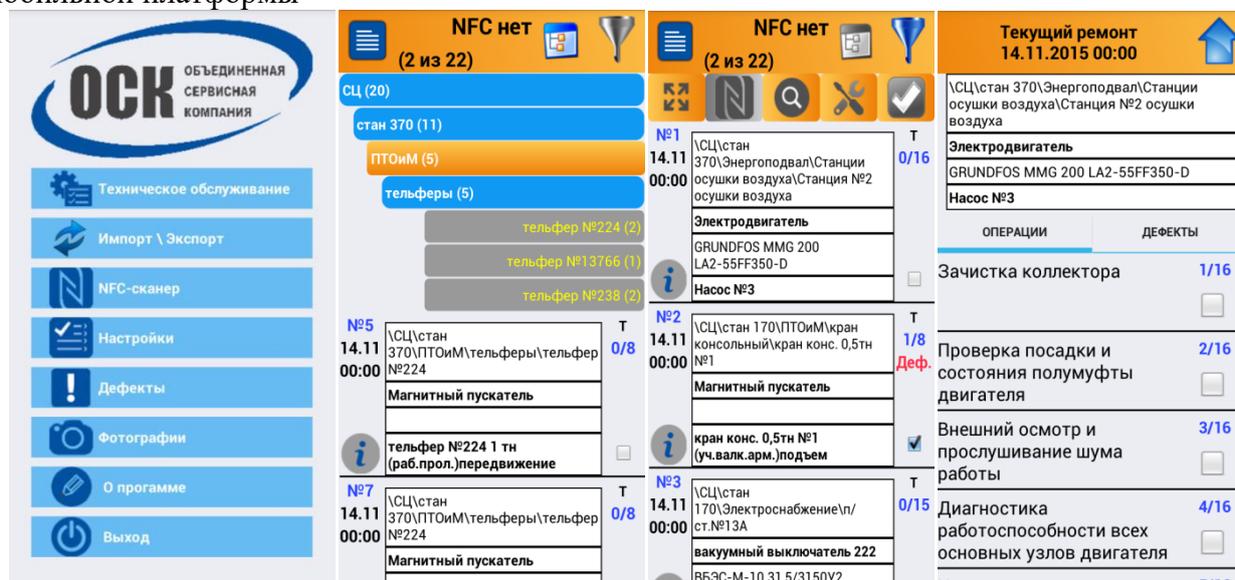


Рис. 6. Вид экранных форм мобильной платформы автоматизированной системы управления техническим обслуживанием и ремонтами оборудования

**Перспективы развития программно-аппаратного комплекса «Мобильная АСУ ТО и Р»**

Развитие пилотного проекта «Мобильная АСУ ТО и Р» планируется по следующим направлениям:

- разработка гибкой системы построения траектории безопасного обхода объектов с учетом критичного состояния оборудования;

- реализация программного модуля для оперативного учета материально-технических ресурсов предприятия;
- построение интерактивной 3D-модели для отображения в режиме онлайн конструкции оборудования;
- разработка модуля для визуализации данных по оборудованию из систем «Мониторинг 2014» и АСУ ТОиР;
- проектирование и разработка программного модуля для управления технологическим оборудованием посредством установления связи с системами 2-го уровня автоматизации (WinCC, InTouch);
- разработка учебно-методических материалов для наглядной демонстрации принципа работы «Мобильная АСУ ТО и Р» для обучения производственного персонала;
- разработка интерактивной инструкции по выполнению операций обслуживания оборудования с возможностями вывода на экран в режиме онлайн.

### Список используемых источников

1. Янченко, Ю.А. Новые подходы к техническому обслуживанию и ремонту оборудования атомных электростанций / Ю.А. Янченко, В.Д. Гуринович, В.Н. Дементьев // Теплоэнергетика. – 2005. – № 12. – С. 10-14.
2. Лазников, Н.М. Обслуживанием и ремонтом в контрактных отношениях авиакомпаний с техническим центром / Н.М. Лазников, Т. Сов // Конкурентоспособность в глобальном мире: экономика, наука, технологии. – 2016. – № 8-2 (21). – С. 44-47.
3. Козин, Е.С. Оптимизация производственно-технической базы по техническому обслуживанию и ремонту спецтехники при ремонте магистральных нефтепроводов / Е.С. Козин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2013. – № 5. – С. 83-92.
4. Рудаченко, А.В. Экспертная система по техническому обслуживанию и ремонту технологического оборудования газопроводов / А.В. Рудаченко, В.А. Рудаченко, А.С. Пашкова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – № 3.
5. Нусс, С.В. Анализ подходов к техническому обслуживанию и ремонту технологического оборудования / С.В. Нусс, И.А. Худякова // Научные исследования и инновации. – 2011. – Т. 5. – № 1. – С. 185-188.
6. Архирейский, А.А. Информационная поддержка услуг по техническому обслуживанию и ремонту автотранспортных средств / А.А. Архирейский // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2011. – № 2. – С. 45-47.
7. Кизим, А.В. Обоснование необходимости автоматизации работ по ремонту и техническому обслуживанию оборудования / А.В. Кизим // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2009. – Т. 6. – № 6 (54). – С. 118-121.
8. Обломец, В.П. Модель управления производством на основе интегрированных ключевых показателей // В.П. Обломец, Е.Г. Филиппов, О.С. Логунова // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2011. – № 1-2. – С. 88-96.
9. Ishmetyev E.N., Logunova O.S., Volshchukov Y.N., Makashov P.L., Barankov V.V., Filippov E.G. On the aspect of implementing solutions for information support of industrial plant control systems // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2016. – Vol. 85. – No 5-8. – P. 1779-1791.
10. Логунов, С.М. Структура и концепция развития автоматизированной системы управления производством в подразделениях металлургического предприятия // С.М. Логунов, Е.Г. Филиппов, О.С. Логунова // Перспективы развития информационных технологий. – 2011. – № 3-2. – С. 114-120.
11. Logunova O.S., Matsko I.I., Posohov I.A., Luk'ynov S.I. Automatic system for intelligent support of continuous cast billet production control processes // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2014. – Vol. 74. – No 9-12. – P. 1407-1418.
12. Баранков, В.В. Варианты постановки задачи оперативно-календарного планирования / В.В. Баранков, В.В. Королева, Е.Г. Филиппов // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2015. – № 2 (7). – С. 41-49.

Материал поступил в редакцию: 19.04.2017  
Материал принят к публикации: 15.05.2017

### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

#### MOBILE APPLICATION OF TECHNICAL MAINTENANCE AND REPAIR OF INDUSTRIAL ENTERPRISE EQUIPMENT: EXPERIENCE OF DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION

*Bovshik P.A., Berlykov E.V., Akhmetshin I.N., Logunov S.M.*

**Abstract.** The paper presents the experience of developing and implementing a mobile platform for an automated control system for maintenance and repair of equipment for an industrial enterprise. The purpose of the project is to: increase the resource intensity of the equipment of long products shop and agglomeration shop on the basis of obtaining current information through the rapid detection of equipment defects, flexible scheduling of the elimination of equipment defects and the timely elimination of identified equipment defects. The following functions of the mobile platform

of the automated control system for equipment maintenance and repair are determined: control of personnel movement through the shop during equipment bypass; generation the reporting documentation; real-time labor costs control. The basis of the hardware of the mobile platform of the automated control system for equipment maintenance and repair is the Symbol TC70 device. Prospective directions of system development are noted. The mobile platform of an automated control system for equipment maintenance and repair for an industrial enterprise is implemented in LLC "United Service Company", Magnitogorsk. Full implementation of the system with coverage of more than 35000 objects of two main shops of OJSC "Magnitogorsk Iron and Steel Works" is planned in 2018.

**Keywords:** Equipment, equipment repair, equipment maintenance, mobile application, software implementation.

#### Referances

1. Yanchenko Yu.A., Gurinovich V.D., Dementev V.N. *Teploenergetika* [Thermal Engineering], 2005, no 12, p. 10-14. (In Russ.)
2. Laznikov N.M., Sov T. *Konkurentosposobnost v globalnom mire: ekonomika, nauka, tehnologii*, 2016, no 8-2 (21), p. 44-47. (In Russ.)
3. Kozin E.S. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki*, 2013, no 5, p. 83-92. (In Russ.)
4. Rudachenko A.V., Rudachenko V.A., Pashkova A.S. *Gorniy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tehnicheskiy zhurnal)*, 2012, no 3. (In Russ.)
5. Nuss S.V., Hudyakova I.A. *Nauchnyie issledovaniya i innovatsii*, 2011, vol. 5, no 1, p. 185-188. (In Russ.)
6. Arhireyskiy A.A. *Intellekt. Innovatsii. Investitsii*, 2011, no 2, p. 45-47. (In Russ.)
7. Kizim A.V. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta*, 2009, vol. 6, no 6 (54), p. 118-121. (In Russ.)
8. Oblomets V.P., Filippov E.G., Logunova O.S. *Matematicheskoe i programmnoe obespechenie sistem v promyshlennoy i sotsialnoy sferah* [Software of systems in the industrial and social fields], 2011, no 1-2, p. 88-96. (In Russ.)
9. Ishmetyev E.N. Logunova O.S., Volshchukov Y.N., Makashov P.L., Barankov V.V., Filippov E.G. On the aspect of implementing solutions for information support of industrial plant control systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, vol. 85, no 5-8, p. 1779-1791.
10. Logunov S.M., Filippov E.G., Logunova O.S. *Perspektiviyi razvitiya informatsionnyih tehnologiy*, 2011, no 3-2, p. 114-120. (In Russ.)
11. Logunova O.S., Matsko I.I., Posohov I.A., Luk'ynov S.I. Automatic system for intelligent support of continuous cast billet production control. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, vol. 74, no 9-12, p. 1407-1418.
12. Barankov V.V., Koroleva V.V., Filippov E.G. *Matematicheskoe i programmnoe obespechenie sistem v promyshlennoy i sotsialnoy sferah* [Software of systems in the industrial and social fields], 2015, no 2 (7), p. 41-49. (In Russ.)

#### ОБ АВТОРАХ:

**Бовшик Павел Александрович** – главный инженер ООО «Объединенная сервисная компания».

**Берляков Евгений Владимирович** – ведущий специалист проектного отдела ООО «Объединенная сервисная компания».

**Ахметшин Ильфат Назымович** – ведущий специалист научно-технического центра ООО «Объединенная сервисная компания».

**Логунов Сергей Михайлович** – инженер научно-технического центра ООО «Объединенная сервисная компания».

#### ОБРАЗЕЦ ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Мобильное приложение технического обслуживания и ремонта оборудования промышленного предприятия: опыт разработки и внедрения / П.А. Бовшик, Е.В. Берляков, И.Н. Ахметшин, С.М. Логунов // *Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах.* – 2017. – Т.5. – №1. – С. 31-37.

Bovshik, P.A., Berlykov, E.V., Akhmetshin, I.N. and Logunov S.M. (2017) Maintenance and repair of industrial enterprise equipment: experience of development and implementation. *Software of systems in the industrial and social fields*, 5 (1): 31-37.

## ПООПЕРАЦИОННОЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В КОМПАС-3D ПРОЦЕССА РОТАЦИОННОЙ ВЫТЯЖКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ С ФИГУРНЫМ КОНТУРОМ ОСЕВОГО СЕЧЕНИЯ

*Кузьмин А.В., Лысов В.А., Щеголев А.В., Иванюк М.В.*

**Аннотация.** В работе рассматривается программное обеспечение для процесса изготовления тонкостенных цилиндрических прецизионных оболочек с фигурным контуром осевого сечения методом ротационной вытяжки прямым способом с утонением стенки. Авторы предлагают вариант пооперационного параметрического моделирования в среде Компас-3D с целью расчёта геометрических параметров и получения полного комплекта чертежей готовой продукции и полуфабрикатов, конструктивно завершённой и исходной трубной заготовки для изготовления указанных оболочек. Авторами выполнена полная постановка задачи и обоснована производственная необходимость решения этой задачи. Рассмотрены некоторые вопросы пооперационного параметрического моделирования в среде Компас-3D в производственных условиях. Определён состав входной и выходной информации. Решение обратной задачи представлено в виде последовательности шагов от готовой продукции до начальной формы заготовки.

**Ключевые слова:** Ротационная вытяжка, тонкостенная оболочка, утонение стенки, параметрическое моделирование, трубная заготовка, деформирующий ролик.

### Введение

Ротационная вытяжка представляет собой процесс получения полой оболочки из заготовки путём деформирования одним или несколькими роликами на специализированном оборудовании с числовым программным управлением (ЧПУ). Изготовление цилиндрических прецизионных оболочек с фигурным контуром осевого сечения осуществляется, как правило, тремя расположенными под углом  $120^\circ$  роликами, сателлитно вращающимися от заготовки, которая устанавливается на цилиндрическую оправку. Ролики перемещаются вдоль образующей оправки.

Характерные особенности и преимущества процесса ротационной вытяжки:

- локальный очаг деформации, образующийся в результате воздействия давящего элемента на материал заготовки;
- заданное утонение толщины стенки заготовки;
- значительная степень деформации, до 80%, в результате чего процесс становится экономически выгодным по сравнению с другими способами изготовления [1];
- высокий коэффициент использования металла;
- процесс является эффективным в условиях серийного и мелкосерийного производства при получении прецизионных тонкостенных осесимметричных цилиндрических оболочек из обычных и труднодеформируемых металлов и сплавов [1].

Основное преимущество ротационной вытяжки заключается в том, что посредством этого процесса можно из простых заготовок получать оболочки сложной формы, минуя во многих случаях ряд таких технологических операций, как механическая, химическая, термическая, сварка, глубокая вытяжка [2].

Тем не менее имеется ряд факторов, ограничивающих широкое применение ротационной вытяжки в промышленном производстве. В значительной мере это связано с тем, что, несмотря на отдельные достижения в этой области, вопросы теоретического и экспериментального анализа технологических и энергосиловых параметров процесса разработаны неполно. Практически отсутствуют методики расчета и выбора оптимальных технологических параметров для обеспечения заданных качественных характеристик изготавливаемых оболочек [3].

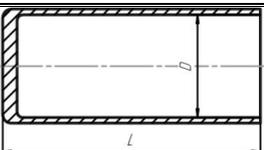
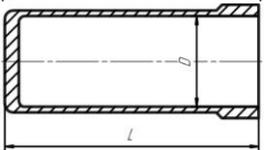
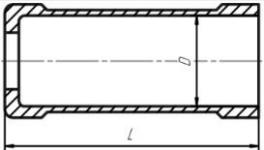
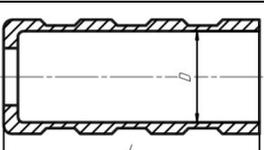
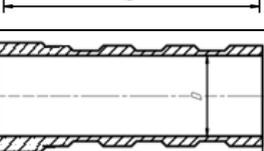
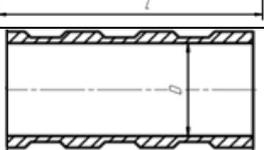
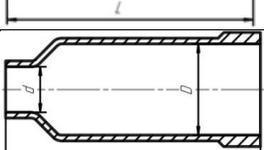
### Постановка задачи и обоснование производственной необходимости решения

Значительное место в общем объёме оболочек, изготавливаемых ротационной вытяжкой, занимает производство тонкостенных цилиндрических оболочек, для изготовления которых различными отечественными предприятиями и зарубежными фирмами созданы специализированные высокопроизводительные станки, позволяющие изготавливать оболочки диаметром от нескольких миллиметров до 6 м и более [3].

Наиболее эффективным метод ротационной вытяжки оказывается при получении крупногабаритных тонкостенных цилиндрических оболочек длиной свыше 1 м. Изготовление та-

ких оболочек традиционными методами (глубокой вытяжкой и механической обработкой) затруднительно, характеризуется высокой трудоёмкостью и связано с использованием большого количества крупногабаритного дорогостоящего прессового, химического и термического оборудования. Ротационная вытяжка позволяет изготавливать такие оболочки на специализированных станках, имеющих сравнительно малые габариты, вес и мощность [3].

Типы цилиндрических оболочек

Тип	Краткое описание	Эскиз
1	Гладкие цилиндрические с закрытой концевой частью	
2	Цилиндрические с дном и концевым утолщением	
3	Цилиндрические с открытым дном и двумя концевыми утолщениями	
4	Цилиндрические с открытым дном с концевыми и промежуточными утолщениями переменной толщины	
5	Цилиндрические с концевыми и промежуточными утолщениями переменной толщины	
6	Цилиндрические с концевыми и промежуточными утолщениями переменной толщины	
7	Цилиндрические с горловиной с концевым утолщением	

готовки, вид которой определяется формой и назначением оболочки. В таблице приведена классификация цилиндрических оболочек с фигурным контуром осевого сечения, изготавливаемых методом ротационной вытяжки [1].

Существенное влияние на станкоёмкость изготовления и экономическую составляющую процесса ротационной вытяжки оказывает выбор материала. Как правило, для изготовления цилиндрических оболочек применяются горячекатаные и холоднокатаные трубы.

### Пооперационная параметризация в среде Компас 3D

Развитие новых технологий постоянно предъявляет все более жесткие требования к современному инженеру-конструктору. За два последних десятилетия информационные технологии коренным образом изменили принципы конструирования, ускорив при этом процесс разработки изделия, повысив его точность и надежность в десятки раз. Следом за этим появился механизм **параметризации** графического изображения [4].

**Параметрический режим** – это режим, в котором можно устанавливать различные размерные (линейные, угловые, радиальные и диаметральные) и геометрические (параллель-

циализированных станках, имеющих сравнительно малые габариты, вес и мощность [3].

В работе рассматривается программное обеспечение для процесса изготовления тонкостенных цилиндрических прецизионных оболочек с фигурным контуром осевого сечения методом ротационной вытяжки прямым способом с утонением стенки. Авторы предлагают вариант пооперационного параметрического моделирования в среде Компас-3D с целью расчёта геометрических параметров и получения полного комплекта чертежей и готовой продукции, полуфабрикатов, конструктивно завершённой и исходной трубной заготовки для изготовления указанных оболочек.

Производственная необходимость решения сформулированной задачи обусловлена следующими факторами:

- оперативное получение указанной выходной информации с высокой степенью точности в режиме реального времени с возможностью интерактивного доступа;
- обоснование высокого коэффициента использования металла;
- сокращение временных затрат на переналадку технологического оборудования на другие виды оболочек.

Одной из основных задач проектирования технологических процессов ротационной вытяжки является выбор за-

ность, перпендикулярность, касание, принадлежность точки кривой, фиксация точки и т.д.) ограничения на объекты модели, а также задавать уравнения и неравенства, определяющие зависимость между параметрами модели [5].

Ряд ограничений может быть определен без явного ввода числовых значений (например, условие касания двух кривых или условие равенства радиусов). Напротив, такие ограничения, как фиксированный радиус окружности или величина размера выражаются числовыми значениями [5].

Отличие параметрического изображения от обычного состоит в том, что в нём предусмотрены взаимосвязи между объектами. Часть взаимосвязей формируется автоматически при вводе (совпадения точек, положение точки на какой-то геометрической кривой, параллельность, перпендикулярность, симметрия, касания). Это выполняется при включении опций настройки «Ассоциировать при вводе» [5].

Параметрическое моделирование (параметризация) позволяет пересчитывать (перестраивать) геометрию объекта в зависимости от его параметров и переменных. Переменными в данном случае являются линейные, диаметральные и угловые размеры оболочки, представленные на рис. 1. При изменении одного или нескольких размеров во вкладке «Переменные» все зависимые элементы перестраиваются в соответствии с указанной геометрией модели.

В качестве примера авторами рассматривается цилиндрическая осесимметричная оболочка с концевыми и промежуточными утолщениями переменной величины, не связанная с каким-либо конкретным изделием. Фигурный контур осевого сечения сформирован с характерными особенностями (тип 5, см. таблице), приведённого в [1]. Номинальные размеры имеют отвлечённые значения.

Предлагается следующий вариант пооперационного параметрического моделирования в среде Компас-3D. Для осуществления импорта-экспорта входных, выходных данных в Компас-3D предлагается среда MS Excel.

### Шаг 1. Параметрический эскиз готовой оболочки

На рис. 1 представлен параметрический эскиз готовой оболочки цилиндрической формы, имеющей ступенчатый профиль осевого сечения. Оболочка состоит из пяти прямолинейных фрагментов  $a_1, a_2, b_1, b_2$  и средней части различной толщины стенки. Внутренний диаметр оболочки  $D_{вн}$ . Переходы между прямолинейными фрагментами заданы коническими скосами с углами  $ugola_1, ugola_2, ugoalb_1, ugoalb_2$ . Минимальная толщина стенки  $s$  в средней части. Наружные диаметры фрагментов  $a_1, a_2 - Da_1, Da_2$ , соответственно. Толщины стенок фрагментов  $b_1, b_2 - sb_1, sb_2$  соответственно. На рис. 2 приведены пооперационные значения геометрических параметров оболочки.

### Шаг 2. Готовая оболочка

Пооперационный расчет основан на принципе сохранения объема оболочки до и после операций ротационной вытяжки. Компас-3D выводит объем 3D-модели во вкладке «Параметры МЦХ» (массоцентровочные характеристики). На рис. 3-5 показаны этапы пооперационного расчета от определения исходных данных готовой оболочки до ее чертежа.

### Шаг 3. Вторая ротационная вытяжка

Основу параметрического моделирования составляет технологическая схема проектирования пооперационного процесса ротационной вытяжки, суть которой в следующем: *от заключительной вытяжки к первой, далее от конструктивно завершённой заготовки к исходной трубной*.

Далее необходимо добавить припуски на механическую обработку (рис. 7, помечено чёрным слева), а также технологический буртик для продольного фиксирования установки заготовки на оправку (рис. 8, помечено чёрным справа).

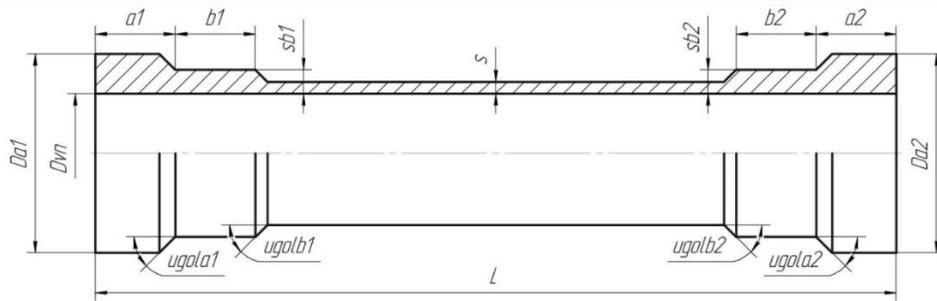


Рис. 1. Параметрический эскиз готовой оболочки. Экспорт в Компас-3D

Пооперационные выходные параметры [Режим совместимости] - Microsoft Excel							
Наименование параметра	Обозначение	Единица измерения	Готовая деталь	Заключительная (вторая) вытяжка	Первая вытяжка	Конструктивно завершенная заготовка	Исходная трубная заготовка
Наружный диаметр фрагмента a1	Da1_	мм	220,00	228,00	228,00	228,00	232,00
Наружный диаметр фрагмента a2	Da2_	мм	220,00	228,00	228,00	228,00	232,00
Внутренний диаметр	Dvn_	мм	206,00	206,00	206,00	206,00	202,00
Длина	L_	мм	1000,00	1020,00	649,08	378,04	384,00
Длина фрагмента a1	a1_	мм	80,00	90,00	90,00	0,00	0,00
Длина фрагмента a2	a2_	мм	80,00	90,00	90,00	0,00	0,00
Длина фрагмента b1	b1_	мм	50,00	50,00	0,00	0,00	0,00
Длина фрагмента b2	b2_	мм	50,00	50,00	0,00	0,00	0,00
Толщина стенки средней части	s_	мм	2,50	2,50	5,00	11,00	15,00
Толщины стенок фрагмента b1	sb1_	мм	5,00	5,00	5,00	11,00	15,00
Толщины стенок фрагмента b2	sb2_	мм	5,00	5,00	5,00	11,00	15,00
Конический скос фрагмента a1	ugola1_	град	20,00	20,00	20,00	0,00	0,00
Конический скос фрагмента a2	ugola2_	град	20,00	20,00	20,00	0,00	0,00
Конический скос фрагмента b1	ugolb1_	град	20,00	20,00	0,00	0,00	0,00
Конический скос фрагмента b2	ugolb2_	град	20,00	20,00	0,00	0,00	0,00
Объем	V_	мм.куб.	2296610,21	2854140,59	2854140,73	2854140,45	3926739,56

Рис. 2. Пооперационные значения геометрических параметров оболочки для экспорта и импорта данных MS Excel–Компас-3D

_Готовая оболочка [Режим совместимости] - Microsoft Excel															
Da1_	Da2_	Dvn_	L_	a1_	a2_	b1_	b2_	s_	sb1_	sb2_	ugola1_	ugola2_	ugolb1_	ugolb2_	
220,00	220,00	206,00	1000,00	80,00	80,00	50,00	50,00	2,50	5,00	5,00	20,00	20,00	20,00	20,00	

Рис. 3. Геометрические параметры готовой оболочки в MS Excel. Экспорт в Компас-3D

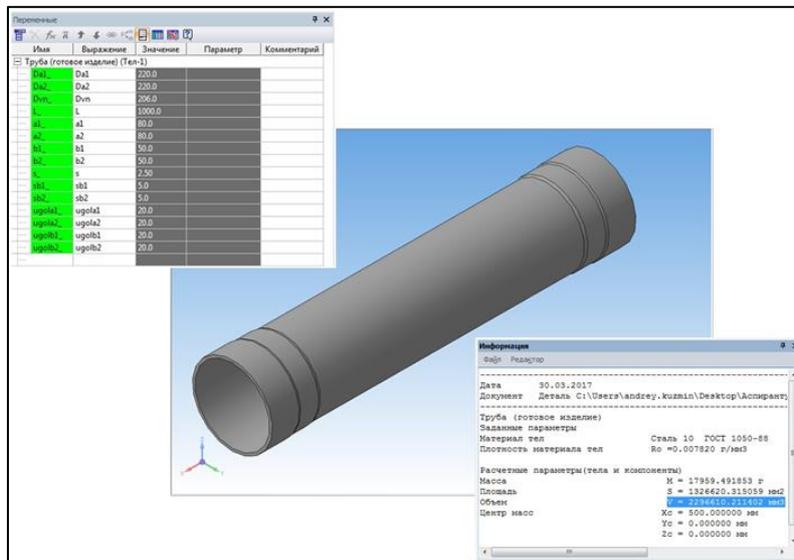


Рис. 4. 3D-модель готовой оболочки. Импорт из Компас-3D

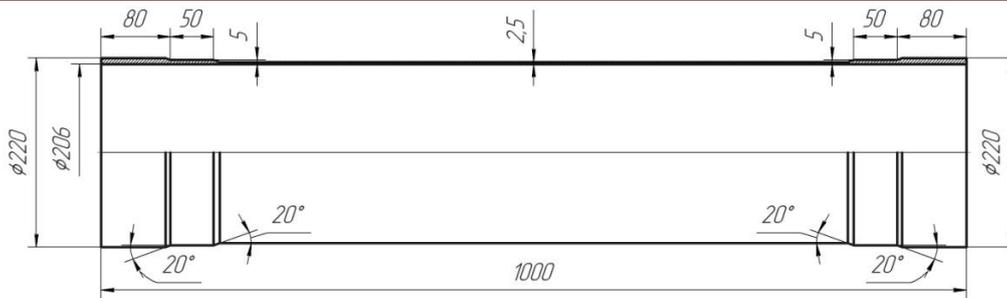


Рис. 5. Чертеж готовой оболочки. Импорт из Компас-3D

Во вкладке «Параметры МЦХ» (рис. 7) Компас-3D выводит объем оболочки  $V = 2854140,6 \text{ мм}^3$ . Этот объем принимается за основу при последующем пооперационном расчете геометрических параметров полуфабрикатов.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	Da1_	Da2_	Dvn_	L_	a1_	a2_	b1_	b2_	s_	sb1_	sb2_	ugola1_	ugola2_	ugolb1_	ugolb2_
2	228,00	228,00	206,00	1020,00	90,00	90,00	50,00	50,00	2,50	5,00	5,00	20,00	20,00	20,00	20,00

Рис.6. Геометрические параметры второй ротационной вытяжки в MS Excel. Экспорт в Компас-3D

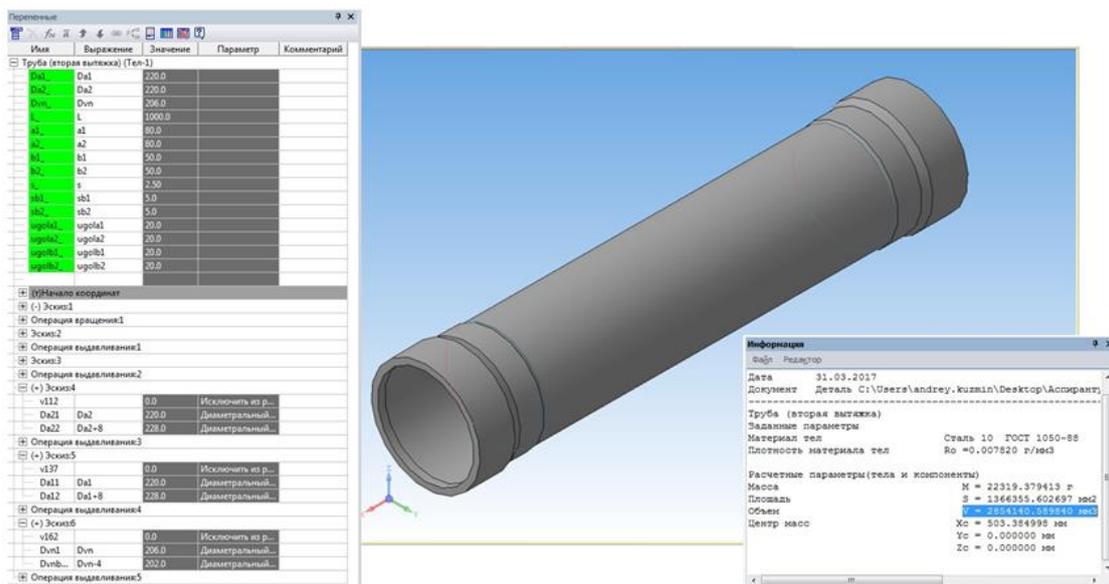


Рис. 7. 3D-модель второй ротационной вытяжки. Импорт из Компас-3D

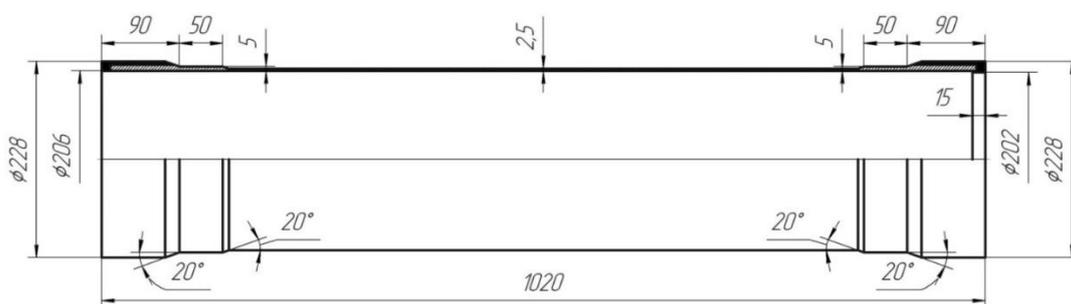


Рис. 8. Чертеж оболочки после второй ротационной вытяжки. Импорт из Компас-3D

#### Шаг 4. Первая ротационная вытяжка

На рис. 9-11 показана реализация первой ротационной вытяжки, включая определение исходных данных, 3D модель и чертеж оболочки после первой ротационной вытяжки.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	Da1_	Da2_	Dvn_	L_	a1_	a2_	b1_	b2_	s_	sb1_	sb2_	ugola1_	ugola2_	ugolb1_	ugolb2_
2	228,00	228,00	206,00	649,08	90,00	90,00	0,00	0,00	5,00	5,00	5,00	20,00	20,00	0,00	0,00

Рис. 9. Геометрические параметры первой ротационной вытяжки в MS Excel. Экспорт в Компас-3D

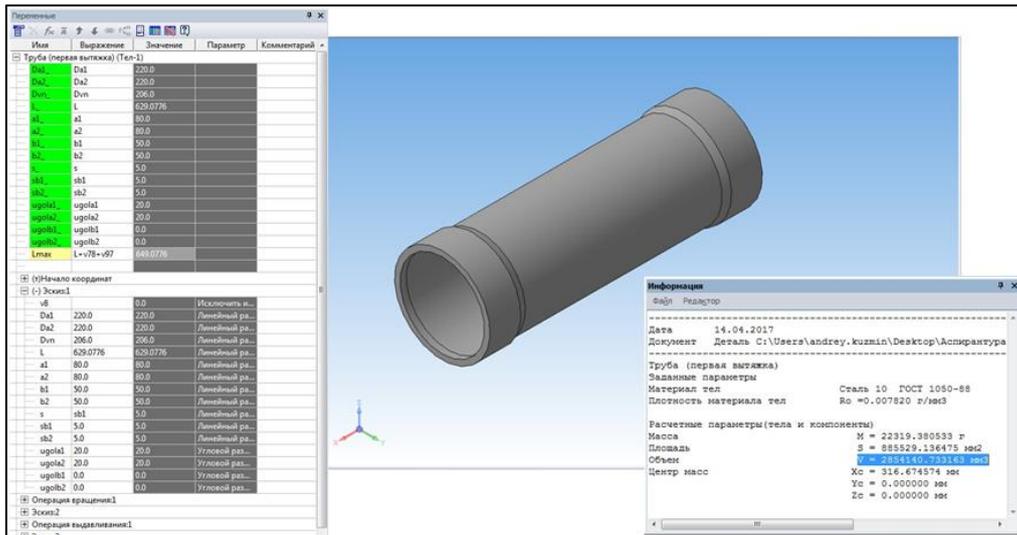


Рис. 10. 3D-модель первой ротационной вытяжки. Импорт из Компас-3D

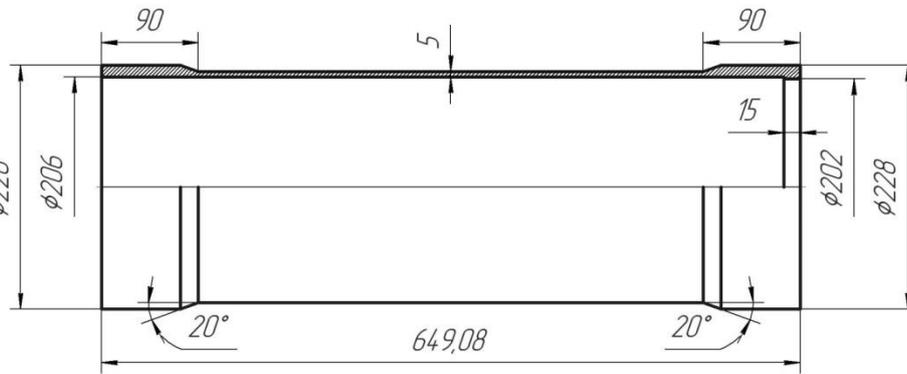


Рис. 11. Чертеж оболочки после первой ротационной вытяжки. Импорт из Компас-3D

### Шаг 5. Конструктивно завершённая заготовка

На рис. 12-14 показаны этапы получения конструктивно завершённой заготовки.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	Da1	Da2	Dvn	L	a1	a2	b1	b2	s	sb1	sb2	ugola1	ugola2	ugolb1	ugolb2
2	228,00	228,00	206,00	378,04	0,00	0,00	0,00	0,00	11,00	11,00	11,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Рис. 12. Геометрические параметры конструктивно завершённой заготовки в MS Excel. Экспорт в Компас-3D

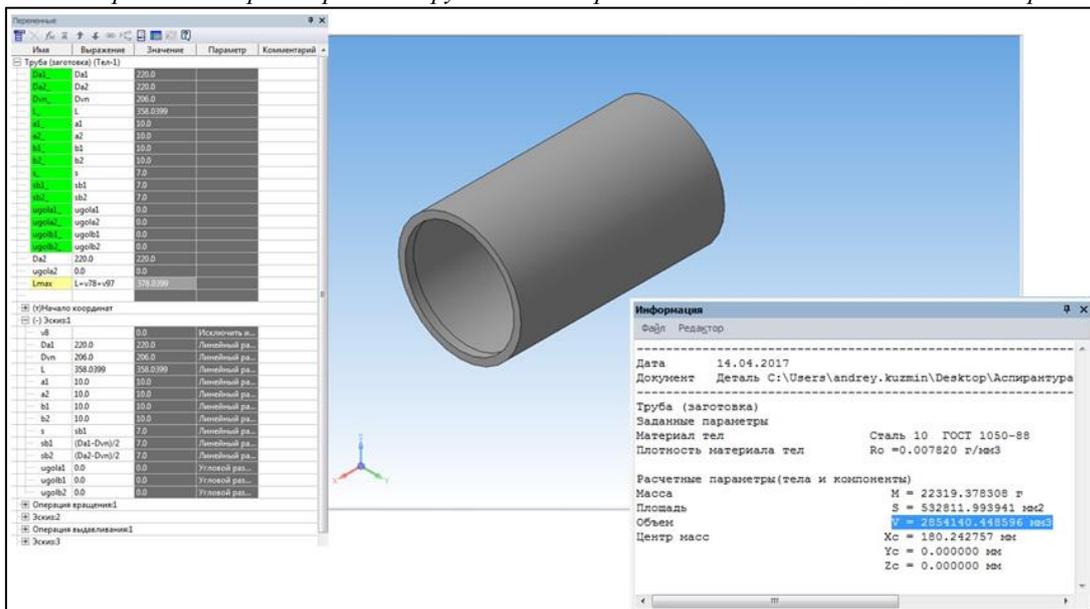


Рис.13. 3D-модель конструктивно завершённой заготовки. Импорт из Компас-3D

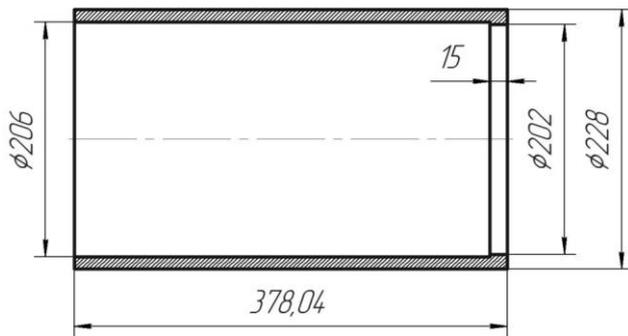


Рис.14. Чертеж конструктивно завершённой заготовки. Импорт из Компас-3D

### Шаг 6. Исходная трубная заготовка

На рис. 15-17 показаны этапы получения исходной трубной заготовки. Для выполнения операций механической обработки геометрические параметры исходной трубной заготовки получены изменением геометрических параметров конструктивно завершённой: увеличена длина +6 мм; увеличен наружный диаметр +4 мм; уменьшен внутренний диаметр -4мм.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	Da1_	Da2_	Dvn_	L_	a1_	a2_	b1_	b2_	s_	sb1_	sb2_	ugola1_	ugola2_	ugolb1_	ugolb2_
2	232,00	232,00	202,00	384,00	0,00	0,00	0,00	0,00	15,00	15,00	15,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Рис.15. Геометрические параметры исходной трубной заготовки в MS Excel. Экспорт в Компас-3D

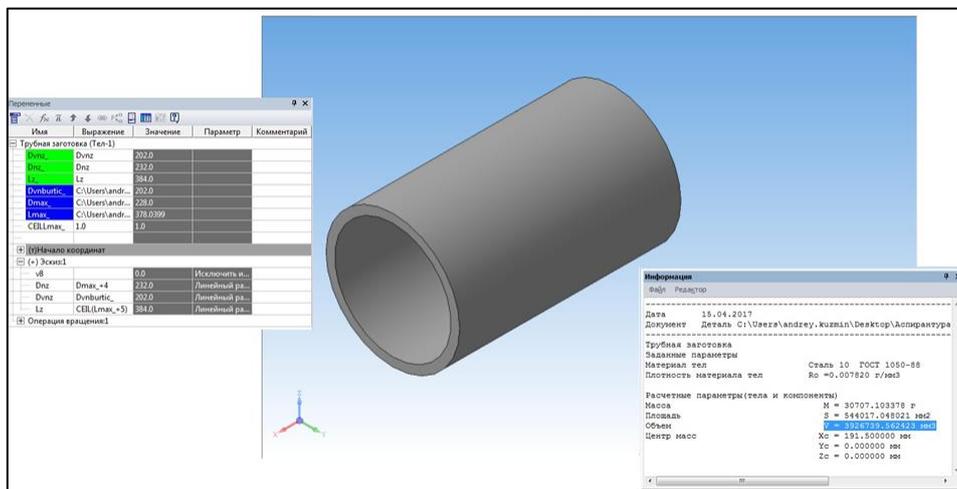


Рис.16. 3D-модель исходной трубной заготовки. Импорт из Компас-3D

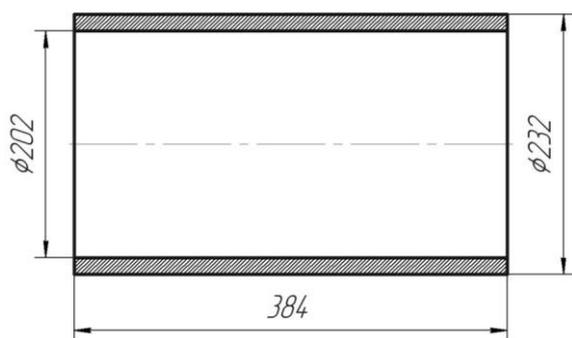


Рис.17. Чертеж исходной трубной заготовки. Импорт из Компас-3D

### Заключение

1. Показано применение пооперационного параметрического моделирования в среде Компас-3D для расчёта геометрических параметров и получения чертежей готовой оболочки и её полуфабрикатов, а также конструктивно завершённой и исходной трубной заготовки.

2. Производственный вариант решения сформулированной в работе задачи обеспечивает оперативное получение выходной информации с высокой степенью

точности в режиме реального времени с возможностью интерактивного доступа;

3. В качестве основы импорта-экспорта в Компас-3D результативно определена среда MS Excel.

4. На конкретном практическом примере показано применение параметрического моделирования в целях автоматизации проектирования технологических процессов изготовления цилиндрических прецизионных оболочек с фигурным контуром осевого сечения.

## Список использованных источников

1. Ковка и штамповка: Справочник: в 4 т. Т. 4 Листовая штамповка [Текст] / Под ред. А.Д. Матвеева; Ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1985–1987. – 544 с.
2. Уик, Ч. Обработка металлов без снятия стружки [Текст] / Ч. Уик. – М.: Мир, 1965. – 549 с.
3. Трегубов, В.И. Ротационная вытяжка с утонением стенки цилиндрических деталей из труб на специализированном оборудовании [Текст] / В. И. Трегубов ; М-во образования Рос. Федерации. Тул. гос. ун-т. – Тула : Тул. гос. ун-т, 2002 (ГУИПП Тул. полиграфист). – 147 с.
4. Кидрук, М.И., КОМПАС-3D V10 на 100 %. – URL:[http://www.e-reading.club/bookreader.php/127274/Kidruk\\_-\\_КОМПАС-3D\\_V10\\_na\\_100\\_.html](http://www.e-reading.club/bookreader.php/127274/Kidruk_-_КОМПАС-3D_V10_na_100_.html) (дата обращения: 9.04.2017).
5. Параметрический режим в Компас 3-D. Модуль 13: Автоматизированные системы. – URL: <http://www.studfiles.ru/preview/3208172/> (дата обращения: 12.04.2017).

Материал поступил в редакцию: 15.04.2017

Материал принят к публикации: 25.05.2017

## INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

### STEP-BY-STEP PARAMETRIC SIMULATION OF ROTARY DRAWING PROCESS OF A CARTRIDGE TUBE WITH AXIAL SECTION OF FIGURED CONTOUR IN KOMPAS-3D

*Kuzmin A.V., Lysov V.A., Schegolev A.V., Ivanyuk M.V.*

**Abstract.** The paper considers software for the process of manufacturing thin-walled cylindrical precision shells with axial section of figured contour by the method of rotary drawing by a direct method with wall thinning. The authors propose a variant of operational parametric modeling in the Kompas-3D environment with the purpose of calculating geometric parameters and obtaining a complete set of drawings of finished products and semi-finished products, a structurally completed and initial tube billet for the manufacture of said shells. The authors carried out a complete statement of the problem and justified the production necessity to solve this problem. Some questions of operational parametric simulation in the Kompas-3D environment in production conditions are considered. The composition of the input and output information is determined. The solution of the inverse problem is represented in the form of a sequence of steps from the finished product to the initial form of the billet.

**Keywords:** Rotary drawing, thin-walled shell, wall's thinning, parametric modelling, tubing stock, straining roller.

#### Referances

1. *Kovka i shtampovka: spravochnik.* Moscow: Mashinostroenie, 1985–1987, 544 p. (In Russ.)
2. Uik Ch. *Obrabotka metallov bez snyatiya struzhki.* Moscow: Mir, 1965, 549 p. (In Russ.)
3. Tregubov V.I. *Rotatsionnaya vytyazhka s utoneniem stenki tsilindricheskikh detaley iz trub na spetsializirovannom oborudovanii.* Tula : TGU, 2002, 147 p. (In Russ.)
4. Kidruk M.I. *KOMPAS-3D V10 na 100 %.* Available at: [http://www.e-reading.club/bookreader.php/127274/Kidruk\\_-\\_КОМПАС-3D\\_V10\\_na\\_100\\_.html](http://www.e-reading.club/bookreader.php/127274/Kidruk_-_КОМПАС-3D_V10_na_100_.html) (Accessed April 9, 2017).
5. *Parametricheskiiy rezhim v Kompas 3-D. Modul 13: Avtomatizirovannyye sistemy.* Available at: <http://www.studfiles.ru/preview/3208172/> (Accessed April 12, 2017).

#### ОБ АВТОРАХ:

**Кузьмин Андрей Васильевич** – заместитель главного конструктора АО «Механический завод», г. Орск. E-mail: [andrewkuzmin@yandex.ru](mailto:andrewkuzmin@yandex.ru).

**Лысов Владимир Анатольевич** – канд. техн. наук, помощник заместителя главного инженера по научной работе АО «Механический завод», г. Орск. E-mail: [lysov.vladimir-orск@yandex.ru](mailto:lysov.vladimir-orск@yandex.ru).

**Щеголев Андрей Владиславович** – канд. техн. наук, генеральный директор АО «Механический завод», г. Орск. E-mail: [andrej-shhegolev@yandex.ru](mailto:andrej-shhegolev@yandex.ru).

**Иванюк Максим Викторович** – начальник центра АСУП АО «Механический завод», г. Орск. E-mail: [ivanyuk@mz-orск.ru](mailto:ivanyuk@mz-orск.ru).

#### ОБРАЗЕЦ ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Пооперационное параметрическое моделирование в Компас-3D процесса ротационной вытяжки цилиндрической оболочки с фигурным контуром осевого сечения / А.В. Кузьмин, В.А. Лысов, А.В. Щеголев, М.В. Иванюк // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2017. – Т.5. – №1. – С. 38-45.

Kuzmin, A.V., Lysov, V.A., Schegolev, A.V. and Ivanyuk M.V. (2017) Step-by-step parametric simulation of rotary drawing process of a cartridge tube with axial section of figured contour in Kompas-3D. Software of systems in the industrial and social fields, 5 (1): 38-454.

## ОБЛАЧНЫЙ ВАРИАНТ СИСТЕМЫ УЧЕТА ПРОДАЖИ ТОВАРОВ ПРИ ОПЛАТЕ В РАССРОЧКУ

Баранков В.В.

**Аннотация.** Разработана и внедрена система учета продажи товаров при оплате в рассрочку. Для разработки использовался облачный вариант сервиса *Google* – таблицы. Приведены основные требования к системе и особенности программной реализации: многопользовательская фильтрация данных; объем и скорость пересчета таблицы; механизмы условного форматирования ячеек, защиты диапазонов ячеек и проверки данных, вводимых в ячейку. Для защиты персональных данных покупателей в рассрочку в системе предусмотрен ряд мер безопасности. Рассмотрен функционал системы учета продажи товаров при оплате в рассрочку, который реализован формулами в ячейках и формулами в дополнительных механизмах *Google*-таблиц с применением программирования в *Google Apps Script* – облачного варианта *Java Script*.

**Ключевые слова:** продажа товаров, рассрочка платежа, облачный сервис, таблица *Google*.

### Постановка задачи

Конфигурации 1С Предприятия часто используют для ведения оперативного учета торговли товарами. Но даже в последних версиях конфигураций (Управление торговлей, Розница, Управление небольшой фирмой, *ERP* Управление предприятием, Комплексная автоматизация, Бухгалтерия и др.) нет полноценной подсистемы учета продажи товаров при оплате в рассрочку. Такая же ситуация и в аналогичных системах учета торговли (например, СОФТ-БАЛАНС Далион. Управление магазином). Поэтому учет оплаты в рассрочку ведут в отдельной системе. Примером такой системы является интернет-сервис «Рассрочка-24» [1].

По техническому заданию торговой сети магазинов автором разработана и внедрена система учета продажи товаров при оплате в рассрочку. Основные требования к системе учета:

- 1) система учета должна быть единой для территориально рассредоточенных магазинов (магазины в одном и разных населенных пунктах);
- 2) затраты на создание системы – одноразовые, без арендной платы за интернет - сервис или облачный сервис типа [1];
- 3) автоматическое ведение учета заключенных и расторгнутых договоров купли - продажи в рассрочку;
- 4) оплата платежей производится наличными деньгами и с использованием электронной банковской карты;
- 5) удобный мониторинг просрочек платежей у клиентов;
- 6) автоматический расчет штрафов за каждый день просрочки платежа;
- 7) автоматическое ведение учета заключенных договоров с целью начисления бонусов для личных продаж продавцов;
- 8) автоматический запрет на изменение данных для заключенных договоров и исправление или внесение платежей задним числом;
- 9) подведение основных итогов продажи товаров при оплате в рассрочку: количество действующих и закрытых договоров, сумма реализованного и возвращенного товара, сумма первоначальных взносов, сумма рассрочки, суммы погашения взносами, сумма просрочки на текущую дату, сумма от процента штрафа по всем взносам и др.

### Реализация системы продажи в рассрочку

После анализа возможных технических вариантов разработки системы продажи в рассрочку выбран дешевый и относительно простой для разработки облачный вариант сервиса *Google* – таблицы. Ограничение 15 Гб бесплатного объема на *Google* – Диске не влияет на систему, т.к. *Google* – таблицы не занимают лимитированного объема на *Google* – Диске. В нашем случае систему использовали семь магазинов в течение полутора лет, за это время было заключено примерно 2 тысячи договоров купли-продажи товаров с рассрочкой платежа. В системе все данные договора купли – продажи располагаются на одной строке таблицы, для этого потребовалось 96 колонок. Суммарный объем всей таблицы составляет на сегодняшний день примерно 200 тысяч ячеек. Скорость пересчета таблицы при изменении данных очень слабо зависит от ее объема, т.к. одно из свойств облачного сервиса – поддерж-

ка пулов ресурсов, т.е. чем больше вычислительных ресурсов требует таблица, тем больше этих ресурсов ей выделяется. Однако на бесплатном аккаунте *Google* скорость пересчета таблицы (независимо от объема) не очень высокая, порядка 5-15 с. Если изменения в таблицу вносит сразу несколько человек, то скорость пересчета таблицы может увеличиться до 30 с. Радикального увеличения скорости пересчета таблицы можно добиться за счет применения фильтров строк таблицы, при оформлении договора купли-продажи продавец работает только с данными одного покупателя. Каждый продавец может устанавливать свои фильтры, не мешая работе других продавцов.

На рис.1 показан внешний вид системы на основной закладке «Покупатели». На закладке «Справочники» собраны все справочные таблицы, используемые для учета рассрочки: перечень магазинов и их адресов, список продавцов и их доверенностей на оформление рассрочки, статусы договоров продажи в рассрочку (заключен, закрыт, возврат, замена, ошибка), виды возврата (брак, новый товар с причиной возврата), статусы покупателя (должник, запрет на договоры), суточный процент штрафа за задержку оплаты, сумма лимита на товар в рассрочку. На закладке «Договор» и «Расторжение» – печатные формы договора купли-продажи в рассрочку и соглашения о досрочном расторжении договора. На закладке «Итоги» подсчитываются итоговые данные за любой период: количество действующих договоров, сумма проданного и возвращенного товара, сумма рассрочки, сумма первоначального взноса и внесения платежей, сумма и процент просрочки платежей и штрафа за просрочку платежей.

№ документа	Цена	Налич	Карт	рассрочки	лимит	Дата 1	Налич	Карт	просрочки	Дата
РД-1350	4360			4360	12640	19 марта 2017 г.	1000			19 марта 2017 г.
РД-1351	4690			4690	12640	15 марта 2017 г.	2700			19 марта 2017 г.
РИЛ-1352	2210	300		1910	12210				320	20 марта 2017 г.
РД-1353	4650			4650	6360	16 марта 2017 г.	1000			20 марта 2017 г.
РД-1354	8990			8990	6360	16 марта 2017 г.	1500			20 марта 2017 г.
РСП-1355	5990			5990	8520	16 марта 2017 г.	1000			21 марта 2017 г.
РСП-1356	4190			4190	8520	13 марта 2017 г.	1000			21 марта 2017 г.
РЛФ-1357	6000			6000	10320	22 марта 2017 г.	1000			22 марта 2017 г.
РД-1358	3990			3990	13510	13 марта 2017 г.	1500			22 марта 2017 г.
РИЛ-1359	3590			3590	12210	16 марта 2017 г.	600			23 марта 2017 г.
РИЛ-1360	3870	2060		1810	13790	21 марта 2017 г.	300			24 марта 2017 г.
РЛФ-1361	5850			5850	5220	16 марта 2017 г.	1000			24 марта 2017 г.
РИЛ-1362	3591			3591	15000	23 марта 2017 г.	3591			25 марта 2017 г.
РСП-1363	6560			6560	10640	11 марта 2017 г.	1100			25 марта 2017 г.
РД-1364	4860			4860	12140	23 марта 2017 г.	1000			25 марта 2017 г.
РИЛ-1365	3411			3411	9979	25 марта 2017 г.	1140			25 марта 2017 г.

Рис. 1. Интерфейс подсистемы учета продажи товаров при оплате в рассрочку

На закладке «Бонусы» (рис. 2) располагается справочная таблица для автоматического начисления бонусов продавцов при оформлении рассрочки. Накопленные бонусы учитываются в зарплате продавцов при учете личных продаж продавцов.

Ячейки таблицы автоматически меняют цвет фона в зависимости от их статуса: белый и голубой фон – ячейки для ввода данных продавцом (текст, число или выпадающий список); желтый фон – расчетные нередактируемые ячейки; затемненные цвета – для недействующих договоров рассрочки. В *Google* – таблицах это реализовано через механизм условного форматирования ячеек.

В верхнем правом углу *Google* – таблицы видны аватары пользователей системы в данный момент времени. Ячейки, с которыми работает каждый пользователь системы, автоматически подсвечиваются и подписываются названиями аватаров (ФИО продавца или менеджера). В *Google*-таблице продавцы и менеджеры могут использовать две службы общения в реальном времени: общий чат внутри таблицы и комментирование (диалог) внутри любой ячейки, открытой для редактирования. Рядом с названием закладки «Покупатели» (см. рис. 1) указано, что в системе есть 32 ячейки, в которых есть диалог общения по поводу данных в этих ячейках.

	A	B	C	D	E	F
1	Статус договора	Вид возврата	Примечание	Договор	Месяц продажи и возврата	Продавец договора
2	Заклучен			новый		1
3	Закрыт		все уплачено	исходный		1
4	Возврат	Брак	вернули деньги	исходный	любые	1
5	Замена	Брак	на точно такой же (артикул, цвет, размер) товар с ценой, как в договоре рассрочки	исходный	любые	1
6	Возврат	Брак		исходный	любые	1
7	Заклучен	Брак	на другой артикул или тот же артикул с другим размером или цветом	новый		1
8					одинаковые	0
9	Возврат	Новый товар	вернули деньги	исходный	разные	-1
10	Замена	Новый товар	на точно такой же (артикул, цвет, размер) товар с ценой, как в договоре рассрочки	исходный	любые	1
11					одинаковые	0,5
12	Возврат	Новый / Размер	на тот же артикул с другим размером или цветом	исходный	разные	-0,5
13	Заклучен	Новый / Размер		новый		0,5
14					одинаковые	0
15	Возврат	Новый товар	на другой артикул	исходный	разные	-1
16	Заклучен	Новый товар		новый		1
17					одинаковые	0
18	Возврат	Новый / Цена	Появилась акционная цена, которой не было в договоре рассрочки. Вернули деньги, покупатель лишается права на рассрочку	исходный	разные	-1

Рис. 2. Справочная таблица для автоматического начисления бонусов продавцов при оформлении рассрочки

В системе реализована гибкая система защиты от неправильных действий продавцов и менеджеров. Для этого использовались два механизма *Google* – таблиц: защита диапазонов ячеек, и проверка данных, вводимых в ячейку. Например, для продавцов защищены от изменений все ячейки, кроме ячеек для ввода; нельзя редактировать введенные ранее данные договора (запрет на изменение задним числом); нельзя ввести дату и сумму платежа за пределами планового периода платежа; проверка на корректность ввода паспортных данных, СНИЛС и т.п.

Для защиты персональных данных покупателей в рассрочку предусмотрен ряд мер безопасности. Для входа в систему используются персональные служебные аккаунты продавцов, а не один пользователь для магазина, под которым работают несколько продавцов. То есть используется персональная, а не коллективная ответственность за нарушения при работе в системе и утечку персональных данных покупателей. Продавец обязан не только указать в договоре свою фамилию, но и зайти в систему через свой служебный персональный аккаунт. Автоматически ведется хронология всех изменений в системе для каждого пользователя системы. Глубина этого журнала практически не ограничена. Можно открыть любую архивную копию данных системы на любой момент времени, когда были изменения в системе, и посмотреть, что делал пользователь в системе.

Пользователи системы учета продажи товаров при оплате в рассрочку разделены на три категории: продавцы с минимальными правами; менеджеры и руководство с расширенными правами; системный администратор (в *Google* – аккаунте автора системы) без ограничений прав. Например, закладки «Справочники», «Итоги» и «Бонусы» (см. рис. 1) скрыты от продавцов.

Почти весь функционал системы учета продажи товаров при оплате в рассрочку реализован формулами в ячейках и формулами в дополнительных механизмах *Google* – таблиц. Некоторые служебные функции (например, удаление старых недействующих договоров) выполнены с применением программирования в *Google Apps Script* – облачный вариант *Java Script* [2, 3].

### Заключение

Возможностей *Google* – таблиц вполне хватило для реализации достаточно сложной системы учета продажи товаров при оплате в рассрочку. Система была разработана одним исполнителем в течение месяца, внедрена в торговой сети магазинов и функционирует в течение 1,5 лет. Планируется доработка сервисных функций системы для коммерческого тиражирования в других организациях.

**Список использованных источников**

1. Как увеличить продажи с помощью сервиса «Рассрочка 24» [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.shopolog.ru/metodichka/attracting-clients/kak-uvlichit-prodazhi-s-pomosch-yu-servisa-rassrochka-24> (дата обращения: 25.04.2017).
2. Google Apps Script. Basic JavaScript features [Электронный ресурс]. – URL: [https://developers.google.com/apps-script/guides/services/#basic\\_javascript\\_features](https://developers.google.com/apps-script/guides/services/#basic_javascript_features) (дата обращения: 25.04.2017).
3. Баранков В.В. Google Apps Script по шагам (в контексте Google таблиц) [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.google.com/presentation/d/1PeAGGCQrnjxdXcczfgxVDFmHLpsM9iHQonwDW2Oc6ac> (дата обращения: 25.04.2017).

Материал поступил в редакцию: 27.04.2017

Материал принят к публикации: 15.05.2017

**INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH**

**CLOUD VARIANT OF SYSTEM ACCOUNTING FOR SALE OF GOODS  
IN PAYMENT BY INSTALLMENTS**

*Barankov V.V.*

**Abstract.** A system of accounting for the sale of goods was developed and introduced when payment is made later. For development, we used the cloud version of the Google service - tables. The main requirements to the system and the features of the software implementation are given: multiuser data filtering; volume and speed of recalculation of the table; mechanisms of conditional formatting of cells, protection of cell ranges and verification of data entered into the cell. To protect personal data of customers by installments, the system provides a number of security measures. The functional of the system of accounting for the sale of goods in payment by installments is considered, which is implemented by formulas in cells and formulas in additional mechanisms of Google tables with the use of programming in Google Apps Script - a cloud variant of Java Script.

**Keywords:** Sale of goods, payment by installments, cloud service, Google table.

**Referances**

1. *Kak uvelichit prodazhi s pomoschyu servisa «Rassrochka 24»*. <https://www.shopolog.ru/metodichka/attracting-clients/kak-uvlichit-prodazhi-s-pomosch-yu-servisa-rassrochka-24> (Accessed April 25, 2017).
2. Google Apps Script. Basic JavaScript features. Available at: [https://developers.google.com/apps-script/guides/services/#basic\\_javascript\\_features](https://developers.google.com/apps-script/guides/services/#basic_javascript_features) (Accessed April 25, 2017).
3. Barankov V.V. Google Apps Script *po shagam (v kontekste Google tablits)*. Available at: <https://docs.google.com/presentation/d/1PeAGGCQrnjxdXcczfgxVDFmHLpsM9iHQonwDW2Oc6ac> (Accessed April 25, 2017).

**ОБ АВТОРАХ:**

**Баранков Владимир Владимирович** – канд. техн. наук, доц. кафедры информатики и информационной безопасности ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». E-mail: [barankov\\_vv@mail.ru](mailto:barankov_vv@mail.ru).

**ОБРАЗЕЦ ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:**

Баранков В.В. Облачный вариант системы учета продажи товаров при оплате в рассрочку // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2017. – Т. 5. – №1. – С. 46-49.

Barankov V.V. (2017) Cloud variant of system accounting for sale of goods in payment by installments. Software of systems in the industrial and social fields, 5 (1): 46-49.

## КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

УДК 519.81

### СТРУКТУРА ЛИНГВИСТИЧЕСКОЙ ПЕРЕМЕННОЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛОЖНОСТИ ПУБЛИКАЦИОННЫХ КОЛЛАБОРАЦИЙ

Ильина Е.А., Арефьева Д.Я.

Очень важным в оценке научно-исследовательской деятельности работников высшего учебного заведения является правильный анализ показателей публикационной активности (ППА), таких как количество публикаций, индекс Хирша, импакт-фактор журналов и т.д. В связи с расширением набора ППА появляется необходимость разработки программного модуля, для которого, в свою очередь, требуется разработать информационную структуру для хранения и обработки информации о публикационных научных коллаборация [1]. Как было сказано в работах [1, 2], в качестве научной публикационной коллаборация понимается взаимодействие двух и более научно-педагогических работников (НПР), являющихся авторами общего научного исследования.

Публикационная коллаборация может быть представлена в виде графа  $G$ , вершинами которого будут являться авторы публикаций, а дугами – цитирующие ссылки авторов друг на друга. Согласно информации, представленной в таблице, приведенной в работе [1, с. 221], граф  $G$  будет являться орграфом, мультиграфом и псевдографом. Также получаемый граф не может быть деревом, так как в нем существуют компоненты связности.

Информация о графах хранится в виде квадратной и несимметричной матрицы смежности вершин, элементы главной диагонали которой отличны от нуля. Каждый элемент матрицы представлен в виде структуры, включающей два элемента: кратность ребра и одномерный массив со структурированными элементами, которые характеризуют свойства ссылки [3-5]. На основе свойств ссылок определяются истинность или ложность публикационных коллаборация:

- наличие большого количества кодов ГРНТИ (Государственный рубрикатор научно-технической информации) статей для одного автора;
- наличие более пяти соавторов в статьях;
- значение импакт-фактора журнала, в котором опубликована статья, меньше значения 0,1;
- отсутствие или малое количество работ, в которых выбранный автор указан на первом месте в списке соавторов;
- отсутствие или малое количество статей, подготовленных в едино авторстве.

Чтобы определить является ли коллаборация ложной, воспользуемся теорией нечетких множеств. Введем лингвистическую переменную «*Collaboration*» и термы (см. рис. 1). Каждой компоненте сопоставлена базовая числовая переменная.

Термы для определения ложности коллаборации

		↓	Истинная	Близка к истинной	Близка к ложной	Ложная
<b>Collaboration</b>	G		1	2-3	4-5	5 и >
	M		1-2	3-5	6-9	10 и >
	IF		0,6 и >	0,4–0,5	0,2-0,3	0,1 и <
	First		75%	50-75%	10-50%	9% и <
	United		75%	50-75%	10-50%	9% и <

↑ Значение компонентов  
 • Компоненты лингвистической переменной  
 • Лингвистическая переменная

*Структура лингвистической переменной «Collaboration»*

На рисунке введены обозначения:  $G$  – количество кодов ГРНТИ;  $M$  – количество соавторов статьи;  $IF$  – значение импакт-фактора журнала;  $First$  – количество работ, в которых выбран-

ный автор указан на первом месте в списке соавторов; *United* – количество статей, подготовленных в единоавторстве.

### Вывод

1. Публикационные коллаборации представлены в виде графа, в котором вершины – множество авторов научных публикаций, ребра – наличие цитирований публикаций.

2. Граф научной публикационной коллаборации является псевдомультиторграфом. Для хранения информации о графах определена квадратная несимметричная матрица смежности с ненулевыми диагональными элементами.

3. Показана структура лингвистической переменной для принятия решения о ложности публикационных научных коллабораций. Для каждой компоненты введена базовая числовая переменная.

### Список используемых источников

1. Логунова, О.С. Научные коллаборации с точки зрения теории графов / О.С. Логунова, Е.А. Ильина, Д.Я. Арефьева // Социально-экономические и правовые системы: Современное видение. – 2017. – С. 219-223.
2. Логунова, О.С. Результаты анализа публикационных коллабораций и синтез информационных структур / О.С. Логунова, Е.А. Ильина, Д.Я. Арефьева // Школа-семинар молодых ученых и специалистов в области компьютерной интеграции производства. – 2016. – С. 257-261.
3. Логунова, О.С. Информационная структура публикационных коллабораций / О.С. Логунова, Е.А. Ильина, Д.Я. Арефьева // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2016. – Т.4. – №1. – С. 48.
4. Методика обработки экспертной информации о качестве научных статей / С.Н. Попов [и др.] // Онтология проектирования. – 2016. – Т.6. – № 2(20). – С. 216-230.
5. Логунова, О.С. Онтология понятийного аппарата для обработки библиографической информации / О.С. Логунова, Е.А. Ильина, С.Н. Попов // Онтология проектирования. – 2016. – Т.6. – № 4(22). – С. 514-524.

### ОБ АВТОРАХ:

**Ильина Елена Александровна** – канд. пед. наук, доцент кафедры вычислительной техники и программирования ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**Арефьева Дарья Яковлевна** – студент кафедры вычислительной техники и программирования ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

---

## Лучшая образовательная программа инновационной России 2017

**09.03.01 Информатика и вычислительная техника**  
**Профиль: Программное обеспечение**  
**вычислительной техники и автоматизированных**  
**систем**



ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный  
технический университет им. Г.И. Носова»  
Кафедра вычислительной техники и  
программирования

### **20 выпусков программистов**

**Награды и достижения образовательной программы.** В ходе реализации образовательной программы были выигран грант по федеральной целевой программе

«Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» по теме: «Совершенствование методов сбора, регистрации, обработки, хранения, передачи и защиты информации для повышения эффективности управления металлургическими агрегатами, направленного на повышение производительности, качества продукции и экологических показателей» (руководитель И.М. Ячиков, д.т.н., профессор, отв. исполнитель О.С. Логунова, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой).

**Профессорско-преподавательский состав.** На кафедре работают 16 преподавателей, из них два профессора и тринадцать доцентов. Ведется активная научно-исследовательская работа, результатом которой является победа в конкурсе научно-исследовательских работ по направлениям: «Обработка, передача и защита информации». Преподаватели публикуются в авторитетных российских и зарубежных журналах. Ими издано порядка 50 учебно-методических работ, получено более 50 свидетельств о регистрации программных систем отраслевого фонда алгоритмов и программ.

**Партнеры в рамках образовательной программы.** ООО «ММК-Информсервис», «КонсОМ СКС», ИТЦ «Аусферр», Compass Plus.

**Достижения студентов и выпускников.** Последние 10 лет студенты кафедры занимали призовые места на различных олимпиадах, конкурсах и входили в первую десятку победителей чемпионатов Урала по спортивному программированию. В 2008 г. – 1 место в открытом командном чемпионате УрГУ. Студенты участвуют в различных конкурсах инновационных проектов и научно-технических разработках. Результатом стали многочисленные победы проектов в номинации информационных технологий. Лучшие студенты регулярно получают стипендии правительства области и Президента РФ за достижения в учебе и науке.

**Социальная и материальная база вуза.** Компьютерные классы и лекционные аудитории оснащены современной техникой, позволяющей демонстрировать видео и аудиоматериал. Преподаватели организуют on-line лекции с ведущими IT-специалистами, позволяющие получить информацию о последних достижениях.

**Возможности студентов.** Практика проходит в информационно-технических отделах и подразделениях ведущих фирм и предприятий Магнитогорска, Челябинской области и Республики Башкортостан. Специалисты делятся профессиональным опытом, проводят ознакомительные экскурсии и лекции, выполняют совместные работы по проектированию, разработке и созданию программных модулей, настройке и использованию программных систем предметного назначения.

**Будущая профессия.** Программист, сетевой администратор, аналитик, проектировщик, конструктор программных платформ

