

ВЕСТНИК
САРАТОВСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА
2005

№ 1 (6)

Научно-технический журнал

Издается с 2003 г.
Выходит один раз в квартал
Март 2005 г.

| | |
|--------------------------------|--------------------------------------|
| Главный редактор | д.т.н., профессор Ю.В. Чеботаревский |
| Зам. главного редактора | д.э.н., профессор В.Р. Атоян |
| Ответственный секретарь | д.т.н., профессор А.А. Игнатьев |

Редакционный совет: д.э.н. В.Р. Атоян (заместитель председателя), д.т.н. А.И. Волчихин, д.т.н. В.А. Голенков, д.и.н. В.А. Динес, д.х.н. В. Зеленский (Польша), д.т.н. В.А. Игнатьев, д.т.н. В.В. Калашников, д.ф.-м.н. Л.Ю. Коссович, д.т.н. И.А. Новаков, д.т.н. А.Ф. Резчиков, д.т.н. Ю.В. Чеботаревский (председатель), д.ф.-м.н. Ян Аврейцевич (Польша), д.э.н. Улли Арнольд (Германия), д.ф.-м.н. Энтони Мерсер (Великобритания), д.э.н. Э.де Соузе Феррейра (Португалия), д.т.н. Т. Чермак (Чехия), д.э.н. Ю.В. Шленов.

Редакционная коллегия: д.т.н. К.П. Андрейченко, д.т.н. А.И. Андриющенко, д.т.н. Ю.С. Архангельский, д.ф.н. А.С. Борщов, д.т.н. А.С. Денисов, д.т.н. Ю.Г. Ивашенко, д.т.н. Ю.Н. Климочкин, д.т.н. В.А. Коломейцев, д.т.н. А.В. Королев, д.т.н. В.А. Крысько, д.т.н. В.И. Лысак, д.т.н. В.Н. Лясников, д.т.н. В.М. Седелкин, к.ф.-м.н. А.Ю. Слепухин, д.т.н. М.А. Щербаков.

Редактор О.А. Панина
Компьютерная верстка Ю.Л. Жупиловой
Перевод на английский язык А.М. Руст

Адрес редакции:
Саратов, 410054, ул. Политехническая, 77
Телефон: (845 2) 52 74 02
E-mail: vestnik @ sstu. ru; vra @ sstu. ru
<http://dni.sstu.ru/vestnik.nsf>
Факс: (845 2) 50 67 40

Лицензия ИД № 06268 от 14.11.01
Подписано в печать 01.03.05
Формат 60×84 1/8 Бум. тип.
Усл. печ. л. 19,5 Уч.-изд. л. 20,75
Тираж 500 экз. Заказ 72
Копипринтер СГТУ,
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77

**VESTNIK
SARATOV
STATE
TECHNICAL
UNIVERSITY
2005**

№ 1 (6)

Scientific Journal

Published since 2003
Once in a quarter
March 2005

| | |
|---------------------------------|---|
| Chief Editor | Professor Y.V. Chebotarevskiy, doctor of technical sciences |
| Chief Editor's assistant | Professor V.R. Atojan, doctor of economical sciences |
| Managing Secretary | Professor A.A. Ignatyev, doctor of technical sciences |

Editing council: Pr. V.R. Atoyan (Vice of the Chairman), Pr. A.I. Volchihin, Pr. V.A. Golenkov, Pr. V.A. Dines, Pr. V. Zelensky (Poland), Pr. V.A. Ignatyev, Pr. V.V. Kalashnikov, Pr. L.Y. Kossovich, Pr. I.A. Novakov, Pr. A.F. Rezhnikov, Pr. Y.V. Chebotarevskiy (the Chairman), Pr. Yan Avreytsevich (Poland), Pr. Oully Arnold (Germany), Pr. Anthony Merser (UK), A D'Souze Ferreyra (Portugal), Pr. T. Chermak (Check Republic), Pr. Y.V. Shlenov.

Editing staff: Pr. K.P. Andreychenko, Pr. A.I. Andryushenko, Pr. Y.S. Arkhangelskiy, Pr. A.S. Borshov, Pr. A.S. Denisov, Pr. Y.G. Ivashenko, Pr. Y.N. Klimochkin, Pr. V.A. Kolomeitsev, Pr. A.V. Korolyov, Pr. V.A. Krysko, Pr. V.I. Lysak, Pr. V.N. Lyasnikov, Pr. V.M. Sedelkin, Pr. A.Y. Slepouhin, Pr. M.A. Sherbakov.

Editor O.A. Panina
Computer design J.L. Zhupilova
Interpreter A.M. Roust

Adress: 77, Politechnicheskaya St.
Saravov, 410054
Russia
Telephone: +8452/52-74-02
E-mail: vestnik @ sstu. ru; vra @ sstu. ru
<http://dni.sstu.ru/vestnik.nsf>
Fax: +8452/50-67-40

License ID № 06268 dated: 01.11.14
Sighned for publishing: 05.03.01
Format 60×84 1/8 Paper type
Apr. tp. l. 19,5 Acc.-pbl. l. 20,75
Circulation 500 issues Order 72
Copier-printer SSTU,
77, Politechnicheskaya St., Saratov, 410054, Russia

СОДЕРЖАНИЕ

ПРОБЛЕМЫ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

| | |
|---|----|
| Жигалов М.В., Павлов С.П. Оптимальная термоизоляция плоской области..... | 5 |
| Крысько В.А., Вахлаева Л.Ф., Молоденкова Т.В. Разностные схемы второго и четвертого порядков точности для уравнений математической физики..... | 13 |
| Лисовский С.М. Формирование моделей знаний для проектирования электроплазменных технологий и оборудования..... | 24 |
| Макеев Н.Н. Движение твердого тела с двухступенным шарниром в потенциальном поле..... | 35 |
| Турлапов В.Е. Анализ положений платформ Стюарта, основанный на варианте структуры, разрешимом в радикалах..... | 54 |
| Шляхов С.М., Кривулина Э.Ф. Задача термоупругости для круглой плиты из пористого материала в одномерном поле температур..... | 59 |

НАДЕЖНОСТЬ МАШИН

| | |
|--|----|
| Виноградов А.Н., Куранов В.Г. Повышение эксплуатационных характеристик буровых шабродочных долот на основе комбинации трибологических эффектов..... | 69 |
| Денисов А.С., Данилов И.К. Влияние условий смазки на толщину масляного слоя в шатунных подшипниках дизельного двигателя..... | 74 |
| Насад Т.Г. Износ лезвийного инструмента при высокоскоростной обработке с дополнительным тепловым воздействием..... | 80 |

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

| | |
|--|----|
| Забудьков С.Л., Яковлев А.В., Финаенов А.И. Изучение электродных процессов на стали и титане в 13,5 М ННО ₃ | 85 |
| Родионов И.В., Сперанский С.К., Протасова Н.В. Особенности электроискрового формирования антиротационных элементов на стоматологических имплантатах цилиндрической формы..... | 91 |

ЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

| | |
|---|-----|
| Хороводова Н.Ю., Байбурин В.Б. Хаотические режимы в магнетронном диоде с пространственно неоднородными электрическим и магнитным полями..... | 103 |
|---|-----|

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ

| | |
|--|-----|
| Подвигалкин В.Я. Системные информационно-технологические связи автоматизированного модульного промышленного производства проволоки..... | 109 |
|--|-----|

ЭКОЛОГИЯ

| | |
|---|-----|
| Ангелюк В.П. Экологические аспекты предельно допустимых норм брака по герметичности металлической консервной тары на предприятиях мясной промышленности..... | 118 |
| Ольшанская Л.Н., Лазарева Е.Н., Клепиков А.П. Экологические аспекты утилизации литиевых химических источников тока..... | 124 |
| Яковлев Б.Н. Модели изменения концентраций парогазовоздушных смесей горючих веществ в воздушных зонах канализационных очистных сооружений в зависимости от точек их замеров..... | 133 |

ГУМАНИТАРНЫЕ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОГО ОБЩЕСТВА

| | |
|---|-----|
| Боскебеев К.Д. Модель управления предприятием на основе прогнозирования с обратной связью..... | 140 |
| Дуплинская Ю.М. Логика подтекста: антимир и изначные миры семантики..... | 145 |
| Олейникова Е.В. Лизинг как форма поддержки инновационной деятельности в ремонтном бизнесе..... | 153 |

ЮБИЛЕИ

| | |
|---|-----|
| Альберт Маркович Кац (к 70-летию со дня рождения)..... | 161 |
| Владилен Васильевич Петров (к 70-летию со дня рождения)..... | 163 |

CONTENTS

PROBLEMS OF NATURAL SCIENCES

| | |
|--|----|
| Zhigalov M.V., Pavlov S.P. Optimum thermal insulation of flat area..... | 5 |
| Krysko V.A., Vakhlaeva L.F., Molodenkova T.V. Difference schemes of second and fourth orders of accuracy for equations of mathematical physics..... | 13 |
| Lisovskiy S.M. Knowledge models forming for designing of electro-plasma technologies and equipment | 24 |
| Makeyev N.N. The movement of a solid body with two-degree articulation joint in a conservative field | 35 |
| Turlapov V.E. Numerical displacement analysis of Stewart platforms, based on a structure variant solvable in radicals..... | 54 |
| Shlyakhov S.M., Krivoulina E.F. Thermoelasticity problem for a thick round plate of porosity material in a one-dimensional field of temperatures..... | 60 |

MACHINE RELIABILITY

| | |
|--|----|
| Vinogradov A.N., Kuranov V.G. Chisel cone rock bits operating characteristics increase on the basis of a speed key of tribological effects..... | 69 |
| Denisov A.S., Danilov I.K. The influence of oiling conditions on the diesel crankshaft oil coating thickness..... | 74 |
| Nasad T.G. Cutting tool wear at high-speed cutting with heat influence | 81 |

NEW MATERIALS AND TECHNOLOGIES

| | |
|---|----|
| Zabud'kov S.L., Yakovlev A.V., Finaenov A.I. Investigation of electrode processes on steel and titanium in 13,5 M HNO ₃ | 85 |
| Rodionov I.V., Speransky S.K., Protasova N.V. Features of electrospark formation of antirotatory elements on odontological implants of the cylindrical form..... | 91 |

ELECTRONICS AND INSTRUMENT MARKING

| | |
|---|-----|
| Khorovodova N.Yu., Bayburin V.B. Chaotic regims in the magnetic diode with spatially non-uniform electrical and magnetic fields..... | 103 |
|---|-----|

AUTOMATION AND MANAGEMENT

| | |
|---|-----|
| Podvigalkin V.J. System information-technological ties of automatized modular industrial production of wire..... | 109 |
|---|-----|

ECOLOGY

| | |
|--|-----|
| Angelyuk V.P. The ecological aspects of the limit permissible standard in the waster tightness of the metal canning containers in the meat industry..... | 118 |
| Olshanskaja L.N., Lasareva E.N., Klepikov A.P. Ecological aspects of lithium chemical cells utilization..... | 125 |
| Yakovlev B.N. Models of the concentration change of vapor-gas-air mixtures of combustible materials in air zones of sewage purifying constructions depending on the points of the taken measurements..... | 133 |

HUMANITARIAN AND ECONOMICAL PROBLEMS OF MODERN SOCIETY

| | |
|---|-----|
| Boskebejev K.D. An enterprise management model on the base of forecast with the feed back..... | 140 |
| Duplinskaya Y.M. Logic of underlying idea: antiwords and inside out words of semantics..... | 146 |
| Oleynikova E.V. Leasing as the support form of innovation activity in after sales service business | 153 |

JUBILEES

| | |
|---|-----|
| Albert Markovich Kats (for the 70-th Anniversary)..... | 161 |
| Vladilen Vasilyevich Petrov (for the 70-th Anniversary)..... | 163 |

ПРОБЛЕМЫ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

УДК 517.940

М.В. Жигалов, С.П. Павлов**ОПТИМАЛЬНАЯ ТЕРМОИЗОЛЯЦИЯ ПЛОСКОЙ ОБЛАСТИ**

Доказывается существование оптимального распределения толщины термоизоляционного слоя по части границы плоской области. Приводятся алгоритм решения этой задачи и численные результаты.

M.V. Zhigalov, S.P. Pavlov**OPTIMUM THERMAL INSULATION OF FLAT AREA**

Existence of optimum distribution of thickness thermal insulation a layer in connection with border of flat area is proved. The algorithm of the decision of this problem and numerical results are presented here.

Введение

Задача оптимальной термоизоляции в более узкой постановке, когда отсутствует изменение относительного расположения поверхностей с различными типами граничных условий, была рассмотрена в [1]. Однако до сих пор отсутствовало доказательство существования оптимального решения.

В данной работе этот пробел устранен. Кроме того, задача теперь рассматривается в более общей постановке, когда отыскивается не только оптимальное распределение теплоизолирующего слоя, но и граница его расположения. Для этой задачи с использованием техники сопряженных переменных в слабой форме [2] проведен анализ чувствительности. В частном случае, когда границы поверхностей неподвижны, результат совпадает с полученным в [1] значением градиента функционала цели.

Отметим, что техника введения сопряженных переменных в слабой форме, разработанная в [2], позволяет применять метод сопряженных переменных для анализа чувствительности в более широких функциональных пространствах, когда все решения соответствующих краевых задач удовлетворяют лишь вариационным уравнениям или неравенствам.

1. Постановка задачи

Пусть граница Γ односвязного изотропного плоского твердого тела Ω состоит из четырех частей: $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4$ (рис. 1). На поверхности Γ_1 задана температура. На поверхности Γ_4 – нулевой поток тепла. На поверхностях Γ_2 и Γ_3 распределяются тонкие слои термоизоля-

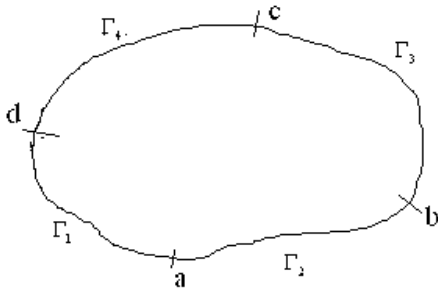


Рис. 1

ции и, следовательно, граничное условие на этих поверхностях может быть задано в виде линейной комбинации температуры и потока тепла.

Отыскивается такое распределение неизвестной толщины на Γ_3 , чтобы суммарные потери тепла через поверхности Γ_2, Γ_3 были минимальными. Общая площадь изолирующего материала на Γ_3 задана. При этих условиях задача представляет не только практический, но и математический интерес [2].

При отсутствии источников тепла в однородной области Ω температурное поле определяется уравнением Лапласа

$$\nabla^2 T = 0 \text{ в } \Omega, \quad (1)$$

с краевыми условиями:

$$T|_{\Gamma_1} = T_0, \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = \frac{\lambda_0}{h_2} (T - T_\infty), \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_3} = \frac{\lambda_0}{h_3} (T - T_\infty), \quad \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_4} = 0, \quad (2)$$

здесь λ, λ_0 – теплопроводности материалов области Ω и теплоизолирующих слоев соответственно; T_∞ – температура окружающей среды; h_2, h_3 – неизвестная и заданная толщины слоев изоляции на границах Γ_2, Γ_3 . На границе Γ_4 толщина изоляции предполагается неограниченно большой и тепло через Γ_4 не передается.

По предположению общая площадь изолирующего материала на Γ_2 задана – пусть она равна A . Обозначим

$$j_1 = \int_{h_2} h_2 dl - A, \quad (h_2 \geq 0), \quad (3)$$

где A – параметр задачи.

Так как в теле отсутствуют источники тепла, то суммарный поток тепла через полную границу тела должен быть равен нулю. Поэтому минимум потока тепла через границы Γ_2, Γ_3 равен максимуму потока через границу Γ_1 или минимуму функционала

$$j = - \int_{\Gamma_1} \lambda \frac{\partial T}{\partial n} dl. \quad (4)$$

Для удобства в дальнейшем перейдем к безразмерным параметрам по следующим соотношениям:

$$\bar{x} = x/L_0, \quad \bar{y} = y/L_0, \quad \theta = \frac{T - T_\infty}{T_1 - T_\infty}, \quad \theta = \frac{T_0 - T_\infty}{T_1 - T_\infty}, \quad \frac{\partial \theta}{\partial n} = \frac{L_0}{T_1 - T_\infty} \frac{\partial T}{\partial n},$$

$$\varepsilon = \frac{\lambda h_3}{\lambda_0 L_0}, \quad \gamma = \frac{L_0 h_2}{A}, \quad a = \frac{\lambda A}{\lambda_0 L_0^2}, \quad J = \frac{j}{\lambda L_0 (T_1 - T_\infty)}, \quad J_1 = \frac{j_1}{A}, \quad (5)$$

где L_0 – характеристический размер и T_1 – сравнительная температура (можно взять $T_1 = T_0$, если это константа). Перепишем (1)-(4) в безразмерных переменных:

$$\nabla^2 \theta = 0 \text{ в } \Omega, \quad (6)$$

с краевыми условиями

$$\theta|_{\Gamma_1} = \theta_0, \quad \left(\frac{\partial \theta}{\partial n} + v(x)\theta \right) \Big|_{\Gamma_2} = 0, \quad \left(\frac{\partial \theta}{\partial n} + h\theta \right) \Big|_{\Gamma_3} = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial n} \Big|_{\Gamma_4} = 0, \quad (7)$$

где $h = \varepsilon^{-1}$, $v(x) = (a\gamma(x))^{-1}$ и ε – заданная, а $\gamma(x)$ – искомая безразмерные толщины на границах Γ_2 и Γ_3 соответственно.

Задача оптимизации теперь ставится таким образом: найти распределение $\gamma(x)$ – нормированной толщины изоляции на Γ_2 и положение точек a, b, c, d , разделяющих границы областей $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4$, так, чтобы функция цели

$$J(v) = \int_{\Gamma_2} v(x)\theta dl + \int_{\Gamma_3} h\theta dl \quad (8)$$

была наименьшей при условии, что выполняются соотношения (6)-(7) и ограничение

$$J_1 = \int_{\Gamma_2} a\gamma(x) dl - 1 \leq 0, \quad (\gamma(x) > 0). \quad (9)$$

2. Существование решения

Для доказательства существования такой функции $\gamma(x)$ задачу (6), (7) поставим более точно. Пусть Ω – ограниченное открытое множество с регулярной границей Γ , и пусть

$$U_\delta = \{v \mid v \in L^\infty; 0 < \beta \leq \xi_0(x) \leq v(x) \leq \xi_1(x), \text{ почти всюду на } \Gamma_2; \xi_0, \xi_1 \in L^\infty(\Gamma_2)\}. \quad (10)$$

Определим множество

$$E = \{\psi \in \rho^\infty(\Omega) \mid \psi|_{\Gamma_1} = 0\}, \quad (11)$$

где $\rho^\infty(\Omega)$ – множество функций, бесконечно дифференцируемых на $\bar{\Omega} \in R^2$. Замыкание множества (11) в норме

$$\|\psi\|_V = \|\psi\|_{H^1(\Omega)} + c\|\psi\|_{L^2(\Omega)}, \quad c > 0, \quad (12)$$

является банаховым пространством $V(\Omega)$ и подпространством пространства $H^1(\Omega)$ [2]. Очевидно

$$V = \{\psi \mid \psi \in H^1(\Omega); \psi|_{\Gamma_1} = 0, \psi|_{\Gamma} \in L^2(\Gamma)\}. \quad (13)$$

На V определим билинейную форму $a_v(\varphi, \psi)$ выражением

$$a_v(\varphi, \psi) = \int_{\Omega} \nabla\varphi \nabla\psi ds + \int_{\Gamma_3} h\varphi\psi dl + \int_{\Gamma_2} v\varphi\psi dl. \quad (14)$$

Очевидно, эта билинейная форма является коэрцитивной на V в силу предположения (10).

Теперь требуется найти решение $\theta(v)$ вариационного уравнения

$$a_v(\theta(v), \psi) = 0, \quad \forall \psi \in V, \quad (15)$$

при условии, что $\theta(v) - \theta_0 \in V$.

Теорема 1. Если множество U_δ задано соотношением (10), то для любого фиксированного элемента $v \in U_\delta$ уравнение (14) имеет единственное решение.

Доказательство. Фактически это утверждение представляет собой частный случай теории монотонных операторов. Из (14) следует, что

$$\begin{aligned} a_v(\varphi_1, \varphi_1 - \varphi_2) - a_v(\varphi_2, \varphi_1 - \varphi_2) &= \int_{\Omega} \nabla(\varphi_1 - \varphi_2) \nabla(\varphi_1 - \varphi_2) ds + \\ &+ \int_{\Gamma_3} h(\varphi_1 - \varphi_2)^2 dl + \int_{\Gamma_2} v(\varphi_1 - \varphi_2)^2 dl \quad \forall \varphi_1, \varphi_2 \in V. \end{aligned} \quad (16)$$

Так как правая часть в (16) неотрицательна, то

$$a_v(\varphi_1, \varphi_1 - \varphi_2) - a_v(\varphi_2, \varphi_1 - \varphi_2) \geq 0. \quad (17)$$

Последнее неравенство означает *монотонность* оператора, порожденного формой $a_v(\varphi, \psi)$ и отображающего $V \rightarrow V'$.

На самом деле справедливо даже более сильное утверждение (*строгая монотонность*)

$$a_v(\varphi_1, \varphi_1 - \varphi_2) - a_v(\varphi_2, \varphi_1 - \varphi_2) \geq \alpha \|\varphi_1 - \varphi_2\|_V. \quad (18)$$

Неравенство (17) и свойство *коэрцитивности*, означающее, что

$$\frac{a_v(\varphi, \varphi)}{\|\varphi\|_V} \rightarrow \infty \text{ при } \|\varphi\|_V \rightarrow \infty, \quad (19)$$

влекут за собой существование элемента $\theta(v)$, удовлетворяющего уравнению (15).

Наконец *единственность* такого элемента $\theta(v)$ непосредственно следует из (17).

Теорема 2. Пусть множество U_δ задано соотношением (10), а $\theta(v)$ – решение уравнения (14). Если функционал цели задан соотношением (8), то существует по крайней мере одно оптимальное управление $g \in U_\delta$.

Доказательство. Пусть $\{v_n\}$ – минимизирующая последовательность, а $\theta_n = \theta(v_n)$. Так как $a_v(\varphi, \varphi) \geq \alpha \|\varphi\|_V^2$, где $\alpha > 0$ – константа, не зависящая от v , то $\|\theta_n\|_V \leq \text{const}$.

Поскольку множество U_δ ограничено и замкнуто в смысле * – слабой топологии пространства $L^\infty(\Omega)$ [3], то можно считать, что существует сходящаяся подпоследовательность такая, что $\theta_n \rightarrow \theta$ слабо в пространстве V , а $v_n \rightarrow g$ * – слабо в пространстве $L^\infty(\Omega)$ и $g \in U_\delta$. Таким образом

$$\theta_n \rightarrow \theta \text{ слабо в } H^1(\Omega); \quad \theta_n|_\Gamma \rightarrow \theta|_\Gamma \text{ слабо в } L^2(\Gamma). \quad (20)$$

Но в силу (20) и теоремы о следах

$$\theta_n|_\Gamma \rightarrow \theta|_\Gamma \text{ слабо в } H^{1/2}(\Gamma). \quad (21)$$

Кроме того, вложение $H^{1/2}(\Gamma) \rightarrow L^2(\Gamma)$ вполне непрерывно [3, гл.1]. Поэтому из (21) следует, что $\theta_n|_\Gamma \rightarrow \theta|_\Gamma$ сильно в $L^2(\Gamma)$. Из этого утверждения получаем

$$\int_{\Gamma_3} h \theta_n \psi \, dl + \int_{\Gamma_2} v_n \theta_n \psi \, dl \rightarrow \int_{\Gamma_2} h \theta \psi \, dl + \int_{\Gamma_3} g \theta \psi \, dl \quad \forall \psi \in V. \quad (22)$$

Итак, $a_g(\theta, \psi) = 0 \quad \forall \psi \in V$, откуда $\theta = \theta(g)$. Но функция $v \rightarrow J(v)$ полунепрерывна снизу в слабой топологии в U_δ и, следовательно,

$$J(g) \leq \underline{\lim} J(v_n) = \inf_{v \in U_\delta} J(v), \quad (23)$$

то есть g – оптимальное управление.

3. Анализ чувствительности

Пусть $\theta(g)$ – температурное поле для

$$g(x) = (a \gamma(x))^{-1}, \quad h = 1/\varepsilon, \quad (24)$$

где $\gamma(x)$ – искомая толщина термоизоляции на границе Γ_2 ; ε – заданная толщина термоизоляции на границе Γ_3 .

Температура внутри области θ удовлетворяет теперь краевой задаче ($q = q_i n_i$):

$$q_i = -\theta_{,i}, \quad q_{i,i} = 0, \quad \theta|_{\Gamma_1} = \theta_0, \quad (-q + h\theta)|_{\Gamma_2} = 0, \quad (-q + g(x)\theta)|_{\Gamma_3} = 0, \quad q|_{\Gamma_4} = 0, \quad (25)$$

а функционалы цели и ограничений определяются, соответственно, соотношениями

$$J = -\int_{\Gamma_1} q \, dl, \quad J_1 = \int_{\Gamma_3} (g)^{-1} \, dl - 1. \quad (26)$$

На основании результатов, полученных в [2], полную вариацию, для функционала $J(g)$, при изменении переменных состояния $g(x)$, a , b , c , d и границы Γ запишем в виде:

$$\begin{aligned} \dot{J} &= -\int_{\Gamma_1} \dot{q} dl - \int_{\Gamma_1} (q_{,n} - 2q K_m) v_n dl - q v_{\mu 0} \Big|_d^a = \\ &= -\int_{\Gamma_1} \dot{q} dl - \int_{\Gamma_1} (q_{,n} - 2q K_m) v_n dl - \left(q \Big|_a \frac{da}{dl} - q \Big|_d \frac{dd}{dl} \right), \end{aligned} \quad (27)$$

где V_n – нормальная составляющая скорости изменения границы; $V_{\mu 0}$ – тангенциальная составляющая скорости изменения границы Γ_1 ; K_m – средняя кривизна границы Γ .

Для получения явной зависимости \dot{J} от \dot{g} исключим неявную зависимость от вариации переменной состояния \dot{q} . Для этого используем технику введения сопряженных переменных в слабой форме [2].

Опуская промежуточные выкладки, получаем:

$$\begin{aligned} \dot{J} &= \int_{\Gamma_3} \dot{g} \theta \theta^* dl - \int_{\Gamma} \left\{ q_i q_i^* + q_i^* \theta_{,i} + q_i \theta_{,i}^* \right\} v_n dl + \\ &+ \int_{\Gamma_3} \left\{ (g \theta \theta^*)_{,n} - 2(g \theta \theta^*) K_m \right\} v_n dl + \int_{\Gamma_2} \left\{ (h \theta \theta^*)_{,n} - 2(h \theta \theta^*) K_m \right\} v_n dl - \\ &- (g - h) \theta \theta^* \Big|_b \frac{db}{dl} + (h \theta \theta^*) \Big|_c \frac{dc}{dl} - q \Big|_a \frac{da}{dl}, \end{aligned} \quad (28)$$

где сопряженная задача удовлетворяет следующим уравнениям

$$q_i^* = -\theta_{,i}^*, \quad q_{i,i}^* = 0, \quad \theta^* \Big|_{\Gamma_1} = 1, \quad (-q^* + h \theta^*) \Big|_{\Gamma_2} = 0, \quad (-q^* + g(x) \theta^*) \Big|_{\Gamma_3} = 0, \quad q^* \Big|_{\Gamma_4} = 0. \quad (29)$$

Как видно из (28), приведенная методика позволила получить более общее выражение для градиента функционала, где учтены не только изменение толщины термоизоляции, но и искривление поверхности, а также изменение точек сопряжения поверхности с различными граничными условиями.

В частном случае, когда граница Γ_2 неподвижна и не меняется положение точек a , b , c , d в (30) остается только одно слагаемое:

$$\dot{J} = \int_{\Gamma_2} \dot{g} \theta \theta^* dl. \quad (30)$$

Это соответствует полученному ранее в [1] значению градиента функционала J .

4. Описание алгоритма

С точки зрения широкого применения численных методов для решения задач оптимизации огромное значение имеет совместимость метода поиска оптимального распределения термоизоляции с методом решения задачи теплопроводности (1), (2). Например, для областей с криволинейной границей, да еще меняющейся, отыскать аппроксимирующие функции в методе Бубнова вообще невозможно. Применение метода сеток также наталкивается на большие трудности для областей с криволинейной границей. Исключение составляет метод конечных элементов, который хорошо приспособлен к областям сложной формы. Однако и здесь возникают свои проблемы. Во-первых, алгоритм должен быть построен так, чтобы на каждом шаге не производилось переразбиение области на конечные элементы, а использовалась первоначальная топологическая информация. Во-вторых, в процессе деформации области необходимо, чтобы конечные элементы не вырождались в линии, плоскости и т.д., а также, чтобы не происходило их наползание друг на друга, образование разрывов между ними и т.п.

Поэтому наиболее естественным для таких задач является метод граничных элементов [4], который лишен перечисленных выше недостатков и хорошо приспособлен к областям сложной формы. Кроме этого, он позволяет понизить на единицу размерность рассматриваемой задачи, а значит, упростить и ускорить процесс нахождения решения задачи теплопроводности.

Для решения задачи оптимизации использовался метод проекции градиента, подробно описанный в [2]. Для решения прямой (25) и сопряженной (29) задач, применялся метод граничных элементов, с линейной аппроксимацией переменных. Граница исследуемой области разбивалась на 360 элементов. Такое количество разбиений позволило достаточно точно описать изменение границы области даже линейными элементами. Для улучшения сходимости метода проекции градиента была введена дополнительная итерационная процедура, в которой каждый последующий шаг использовал решение, полученное на предыдущем шаге, в качестве начального приближения. Это позволило существенно ускорить процесс нахождения оптимальной толщины. При этом замечено, что ограничение для J_1 из (26) во всех случаях выполняется в виде равенства, что говорит о том, что оптимальное решение находится на границе допустимой области.

5. Численные результаты

В качестве примера рассмотрим термоизоляцию двумерной квадратной области: $\{0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1\}$. На Γ_1 задается распределение температуры четырех типов: 1-й тип – $\theta|_{\Gamma_1} = 1$, при $0 \leq x \leq 1$; 2-й тип – $\theta|_{\Gamma_1} = 2x$, при $0 \leq x \leq 1$; 3-й тип – $\theta|_{\Gamma_1} = 4x$ при $0 \leq x \leq 0,5$, $\theta|_{\Gamma_1} = 4(1-x)$, при $0,5 < x \leq 1$; 4-й тип – $\theta|_{\Gamma_1} = 4(0,5-x)$ при $0 \leq x \leq 0,5$, $\theta|_{\Gamma_1} = 4(x-0,5)$, при $0,5 < x \leq 1$. На границе Γ_2 расположен оптимизируемый слой термоизоляции, причем площадь термоизоляции, распределенной по одной стороне квадрата, бралась равной 1. На границе Γ_3 задан слой термоизоляции толщиной 0,1. На границе Γ_4 задан нулевой тепловой поток. Выигрыш от оптимизации границы подсчитывался по формуле $\frac{J_{const} - J_{opt}}{J_{const}} \cdot 100\%$. Здесь J_{const} – значение функции цели, при постоянном распределении толщины термоизоляции, на Γ_2 . J_{opt} – значение функции цели, полученное после оптимизации. Рассматривались различные комбинации границ области. Ниже приведена таблица выигрыша для различных комбинаций (схем) расположения границ, в зависимости от типов температурной нагрузки.

| Тип нагр., % Схемы | 1-й тип | 2-й тип | 3-й тип | 4-й тип |
|------------------------------------|---------|---------|---------|---------|
| $\Gamma_1\Gamma_2\Gamma_3\Gamma_4$ | 5,6 | 9 | 2 | 8,71 |
| $\Gamma_1\Gamma_2\Gamma_3\Gamma_3$ | 3 | 7,4 | 1,3 | 4,1 |
| $\Gamma_1\Gamma_2\Gamma_4\Gamma_4$ | 2,5 | 5,8 | 0,7 | 6,3 |
| $\Gamma_1\Gamma_2\Gamma_2\Gamma_4$ | 2,33 | 5,67 | 0,66 | 2,14 |
| $\Gamma_1\Gamma_2\Gamma_2\Gamma_2$ | 2,04 | 4,9 | 0,9 | 4,24 |
| $\Gamma_1\Gamma_2\Gamma_2\Gamma_3$ | 1,94 | 5,84 | 0,88 | 2,75 |
| $\Gamma_1\Gamma_2\Gamma_4\Gamma_3$ | 1,86 | 5,4 | 0,5 | 2,9 |
| $\Gamma_1\Gamma_3\Gamma_2\Gamma_4$ | 0,34 | 0,135 | 0,2 | 0,35 |
| $\Gamma_1\Gamma_4\Gamma_2\Gamma_4$ | 0,14 | 0,17 | 0,11 | 0,17 |
| $\Gamma_1\Gamma_3\Gamma_2\Gamma_3$ | 0,004 | 0,004 | 0,008 | 0,003 |

Как видно из таблицы наибольший выигрыш дают схемы, у которых оптимизируемая граница находится вблизи границы с заданной температурой. Для одной и той же схемы наибольший выигрыш дают тепловые нагрузки 2-го и 4-го типов, кроме схем, когда оптимизируемая граница находится напротив границы, с заданной температурой.

На рис. 2-5 приведены графики потоков и толщины изоляции для схемы $\Gamma_1\Gamma_2\Gamma_3\Gamma_4$, для всех типов нагрузки. Графики 2, а-5, а показывают распределение потока на оптимизируемой границе. Пунктирная линия соответствует потоку в конструкции с постоянной толщиной термоизоляции, сплошная линия – потоку в конструкции после оптимизации. Как видно из графиков, после оптимизации поток на границе Γ_2 становится практически постоянным. Графики 2, б-5, б представляют собой распределение толщины теплоизоляции на оптимизируемой границе.

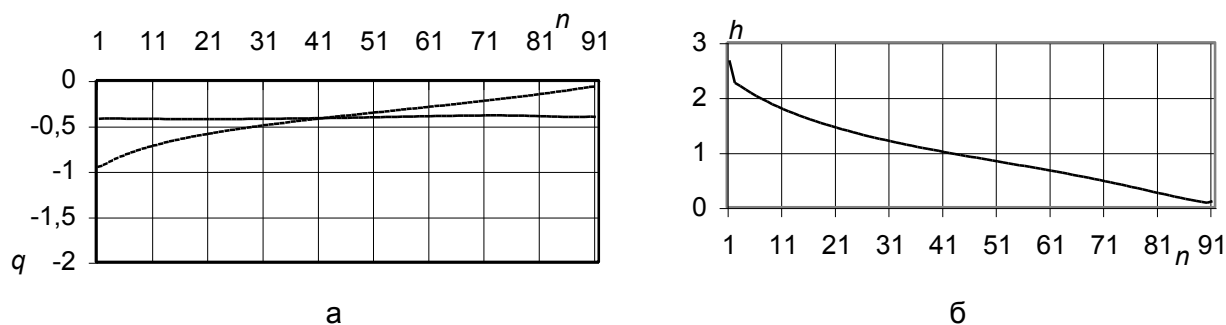


Рис. 2

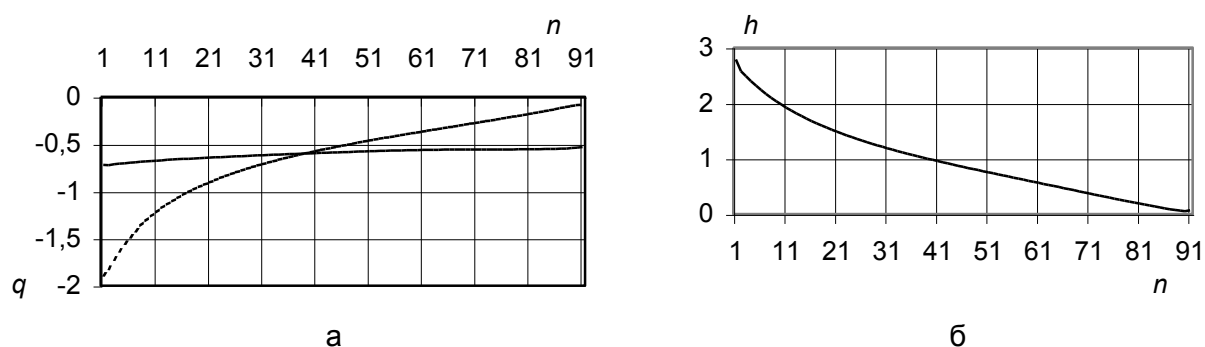


Рис. 3

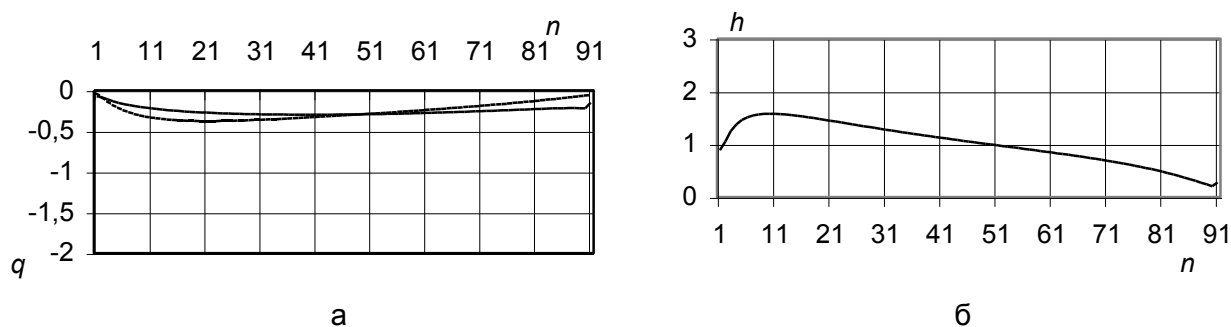


Рис. 4

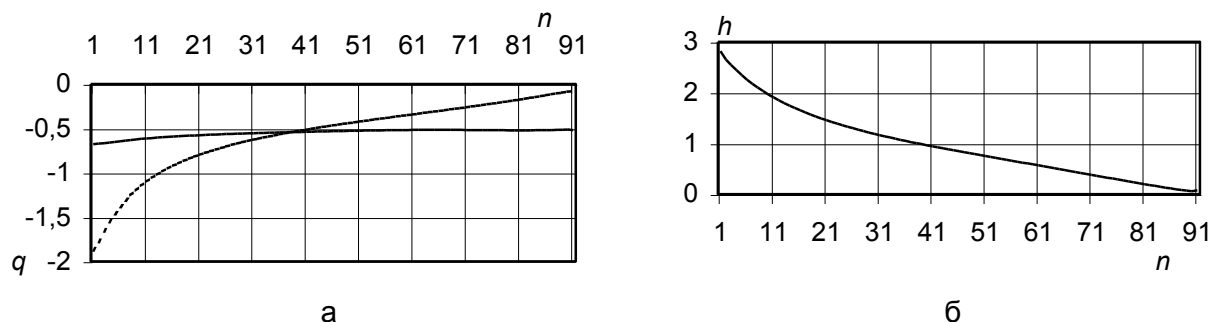


Рис. 5

При сравнении графиков, для каждого типа тепловой нагрузки, можно сделать вывод о том, что вид оптимизируемой границы зеркально повторяет вид графика потока в исходной конструкции. Это заключение распространяется и на другие схемы. На основании этого можно высказать предположение о моделировании теплоизоляции рассмотренных конструкций, а именно вид оптимизируемой границы можно представить на основании графика потока на ней. Это распределение толщины термоизоляции можно считать начальным приближением для проведения дальнейшего исследования по описанному выше алгоритму. Такой подход, по нашему мнению, существенно ускорит процедуру нахождения оптимального распределения термоизоляционного материала.

Заключение

Обратим внимание, что доказано существование оптимального решения лишь для случая оптимального распределения толщины термоизоляции. В более общей постановке, для которой хотя и получено выражение градиента (29), доказательство существования оптимального решения авторам неизвестно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Meric R.A. Optimal thermal insulation by the boundary element method // Numerical Heat Transfer. 1986. Vol. 9, № 2. P. 163-182.
2. Крысько В.А., Павлов С.П. Оптимизация формы термоупругих тел. Саратов: СГТУ, 2000. 160 с.
3. Лионс Ж.-Л. Оптимальное управление системами, описываемыми уравнениями с частными производными. М.: Мир, 1972. 414 с.
4. Бреббия К., Теллес Ж., Вроубел Л. Методы граничных элементов. М.: Мир, 1987. 524 с.

Павлов Сергей Петрович –

кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры «Высшая математика»
Саратовского государственного технического университета

Жигалов Максим Викторович –

кандидат технических наук, доцент кафедры «Высшая математика»
Саратовского государственного технического университета

В.А. Крысько, Л.Ф. Вахлаева, Т.В. Молоденкова

РАЗНОСТНЫЕ СХЕМЫ ВТОРОГО И ЧЕТВЕРТОГО ПОРЯДКОВ ТОЧНОСТИ ДЛЯ УРАВНЕНИЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

При решении начально-краевых задач для уравнений математической физики разностным методом важным вопросом является выбор порядка аппроксимации по пространственным координатам, а также поиск экономичного алгоритма решения соответствующих систем разностных уравнений. В работе построены схемы повышенной точности для многомерного слабонелинейного уравнения теплопроводности, волнового уравнения, уравнения колебания пластинки, уравнения движения пластинки в кинематической гипотезе Кирхгофа. Проведено сравнение со схемами второго порядка точности на модельных задачах. Выявлен экономичный алгоритм решения нелинейных разностных уравнений для каждой задачи.

V.A. Krysko, L.F. Vakhlaeva, T.V. Molodenkova

DIFFERENCE SCHEMES OF SECOND AND FOURTH ORDERS OF ACCURACY FOR EQUATIONS OF MATHEMATICAL PHYSICS

At the decision of initial value or boundary value problems for the equations of mathematical physics by difference method the important question is the choice of approximation order on spatial coordinates, and also search of economic algorithm of the decision of corresponding systems of difference equations. Schemes of the raised accuracy for many-dimensional weakly nonlinear equations of heat conductivity, the wave equation, the equation of fluctuation of a plate, the equation of movement of a plate in Kirhgof's kinematics hypothesis are constructed in this work. Comparison with circuits of the second order of accuracy on modelling problems is carried out. The economic algorithm of decision of nonlinear difference equations for each problem is revealed.

При численном решении начально-краевых задач для уравнений математической физики разностным методом возникает проблема выбора того или иного порядка аппроксимации разностной схемы. Чем выше порядок аппроксимации по пространственным координатам, тем меньше порядок системы разностных уравнений. При решении нестационарных задач аппроксимация второй производной по времени в уравнении и первой производной в начальном условии имеет только второй порядок. Поэтому для получения требуемой точности приходится выбирать достаточно мелкий шаг по времени. Повысить порядок аппроксимации по времени возможно, если применить метод прямых в сочетании с разностным методом по пространственным координатам, а для решения системы дифференциально-разностных уравнений использовать метод Рунге-Кутты четвертого порядка. В этом случае начальные условия ($\partial w / \partial t = \varphi_2(x, y)$) аппроксимируются точно. Исследования разностных схем проводились на модельных задачах для следующих уравнений: одномерного и двумерного волновых уравнений, уравнения колебания пластинки, уравнения движения пластинки в кинематической гипотезе Кирхгофа и слабонелинейного многомерного уравнения теплопроводности. По каждой задаче был найден оптимальный алгоритм.

1. Начально-краевая задача для одномерного волнового уравнения:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + f(x,t), \quad 0 < x < 1, \quad 0 < t \leq T, \quad (1)$$

$$U(x,0) = U_0(x), \quad \frac{\partial U(x,0)}{\partial t} = U_1(x), \quad 0 < x < 1, \quad (2)$$

$$U(0,t) = \mu_1(t), \quad U(1,t) = \mu_2(t), \quad 0 \leq t \leq T. \quad (3)$$

Введем сетку $\omega_{ht} = \{x_i = ih, i = \overline{0, N}, h = 1/N; t_j = j\tau, j = \overline{0, M}, \tau = T/M\}$ и сеточную функцию $y_i^j = y(x_i, t_j)$. Задаче (1)-(3) сопоставим разностную схему с весами

$$y_{it} = \Lambda y^{(\sigma)} + \varphi, \quad (x,t) \in \omega_{ht}, \quad (4)$$

$$y_i^0 = U_0(x_i), \quad y_i^1 = y_i^0 + \frac{\tau}{2}(U_0''(x_i) + f(x_i, 0)) + O(\tau^2), \quad i = \overline{1, N-1},$$

$$y_0^j = \mu_1(t_j), \quad y_N^j = \mu_2(t_j), \quad j = \overline{0, M}, \quad (5)$$

где

$$y_{it} = (y_i^{j+1} - 2y_i^j + y_i^{j-1})/\tau^2, \quad \Lambda y_i = y_{\bar{x}x} = (y_{i-1} - 2y_i + y_{i+1})/h^2,$$

$$y^{(\sigma)} = \sigma y^{j+1} + (1-2\sigma)y^j + \sigma y^{j-1}, \quad \sigma = \text{const} > 0.$$

Вводя функцию погрешности решения $z = y - U$, подставляя в (4) вместо $y = z + U$, получим разностное уравнение относительно погрешности z : $z_{it} = \Lambda z^{(\sigma)} + \psi, (x,t) \in \omega_{ht}$, где $\psi = \varphi + \Lambda U^{(\sigma)} - U_{it}$ является погрешностью аппроксимации разностной схемы (4) на решении $U(x,t)$ исходной задачи (1). Если схема аппроксимирует исходную задачу и устойчива, то она сходится, и порядок точности схемы совпадает с порядком аппроксимации [1]. При $\sigma=0$ схема (4) – явная, она условно устойчива при $\tau < h$, погрешность аппроксимации $\psi = O(\tau^2 + h^2)$, если $\varphi_i^j = f(x_i, t_j)$. При $\sigma \geq 1/4$ схема неявная, безусловно устойчива, погрешность аппроксимации $\psi = O(h^2 + \tau^2)$, если $\varphi_i^j = f(x_i, t_j)$. При $\sigma = \sigma_* = \frac{1}{4(1-\varepsilon)} - \frac{h^2}{12\tau^2}$ и $\varphi^j = f(x_i, t_j) + \frac{h^2}{12} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}$

погрешность аппроксимации $\psi = O(h^4 + \tau^2)$, это схема повышенной точности. Для определения y^{j+1} получаем из (4)-(5) трехточечную разностную краевую задачу

$$\sigma \gamma^2 (y_{i+1}^{j+1} + y_{i-1}^{j+1}) - (1 + 2\sigma \gamma^2) y_i^{j+1} = -F_i, \quad i = \overline{1, N-1}, \quad y_0^{j+1} = \mu_1^{j+1}, \quad y_N^{j+1} = \mu_2^{j+1},$$

$$F_i = (2y_i^j - y_i^{j-1} + \tau^2(1-2\sigma)\Lambda y^j + \sigma \tau^2 \Lambda y^{j-1} + \tau^2 \varphi), \quad \gamma = \frac{\tau}{h},$$

которая решается методом прогонки.

Исследования на модельных задачах показали, что оптимальным алгоритмом среди неявных схем является схема повышенной точности $O(h^4 + \tau^2)$, т.к. шаг по пространственной координате в 10 раз больше, чем для схем $O(h^2 + \tau^2)$, что приводит к уменьшению в 10 раз порядка системы разностных уравнений, а, следовательно, к уменьшению затрат машинного времени.

Модельные задачи соответствуют точным решениям:

$$1. U(x,t) = x^2 t^2 + 5x + t;$$

$$2. U(x,t) = (\sin \pi x)t + x^2;$$

$$3. U(x,t) = x^4 t + x t^3 + 2;$$

в области $\bar{D} = \{0 \leq x \leq 1, 0 \leq t \leq 10\}$.

Результаты исследований приведены в табл. 1, где $\|z\|_{h,\tau}^{(k)} = \max_{i,j} |y_i^j - U_i^j|$ – погрешность решения на сетке $\omega_{h,\tau}$, $k=1,2,3$ – номер задачи.

Таблица 1

Влияние порядка аппроксимации на шаги сетки h и τ

| Порядок аппроксимации | $O(h^4+\tau^2)$ | $O(h^2+\tau^2)$ | |
|----------------------------|-----------------|-----------------|--------------|
| | | | |
| σ | σ^* | 0.5 | 1/3 |
| $h; \tau$ | 0.1 ; 0.01 | 0.01; 0.01 | 0.01; 0.01 |
| $\ z\ _{h,\tau}^{(1)}$ | 0.037 | 0.040 | 0.039 |
| $\ z\ _{h,\tau}^{(2)}$ | 0.025 | 0.031 | 0.030 |
| $\ z\ _{h,\tau}^{(3)}$ | 0.042 | 0.045 | 0.043 |
| $h_1; \tau_1$ | 0.05; 0.001 | 0.001; 0.001 | 0.001; 0.001 |
| $\ z\ _{h_1,\tau_1}^{(3)}$ | 0.009 | 0.012 | 0.012 |

Применим теперь к задаче (1) метод прямых

$$\begin{aligned} \frac{dy_i}{dt} &= P_i, \quad 1 \leq i \leq N-1, \\ \frac{dP_i}{dt} &= y_{\bar{x},i} + \varphi(x_i, t), \quad x_i \in \omega_h. \end{aligned} \tag{6}$$

Порядок системы дифференциально-разностных уравнений равен $2(N-1)$. Начальные условия (2) задаются точно.

$$y_i(0) = U_0(x_i), \quad P_i(0) = U_1(x_i), \quad 1 \leq i \leq N-1. \tag{7}$$

Краевые условия:

$$y_0^j = \mu_1(t_j), \quad y_N^j = \mu_2(t_j). \tag{8}$$

Решая систему дифференциально-разностных уравнений (6)-(8) методом Рунге-Кутты 4-го порядка, получим окончательно погрешность аппроксимации $\psi = O(h^4 + \tau^2)$, если $\varphi = f(x, t)$;

$$\psi = O(h^4 + \tau^2), \quad \text{если } \varphi = f(x, t) + \frac{h^2}{12} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}.$$

Решение системы дифференциально-разностных уравнений (6) находим по формулам Рунге-Кутты 4-го порядка

$$Y_i^{j+1} = Y_i^j + \frac{\tau}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4), \quad i = \overline{1, N-1}, \tag{9}$$

где $Y^j = (y_1^j, y_2^j, \dots, y_{N-1}^j, P_1^j, P_2^j, \dots, P_{N-1}^j)$ – искомый вектор решения системы (6), записанной в векторном виде:

$$\frac{dY}{dt} = F(t, Y). \tag{10}$$

В (9) k_i вычисляются по формулам

$$k_1 = F(t_j, Y^j), \quad k_2 = F\left(t_j + \frac{\tau}{2}, Y^j + \frac{\tau}{2}k_1\right),$$

$$k_3 = F\left(t_j + \frac{\tau}{2}, Y^j + \frac{\tau}{2}k_2\right), \quad k_4 = F(t_j + \tau, Y^j + \tau k_3). \quad (11)$$

Методы Рунге-Кутты являются явными ($\sigma=0$) и одношаговыми, счет идет по явным формулам. На практике рекомендуется проводить расчеты на нескольких сгущающихся сетках. Если при сгущении сетки решение мало меняется, то требуемая точность достигнута.

Для решения модельных задач 1, 2, 3 применим метод Рунге-Кутты (9) с аппроксимацией по пространственной координате $O(h^4)$ и $O(h^2)$. Результаты приведем в табл. 2. Сравнение табл. 1 и 2 показало, что наиболее экономичным алгоритмом является метод прямых с погрешностью аппроксимации $\psi=O(\tau^4+h^4)$, т.е. метод Рунге-Кутты 4-го порядка $O(\tau^4)$ с аппроксимацией по x $O(h^4)$.

Таблица 2

Влияние порядка аппроксимации в методе Рунге-Кутты на число уравнений

| Порядок аппроксимации | Рунге-Кутта $O(h^4+\tau^4)$ | Рунге-Кутта $O(h^2+\tau^4)$ |
|------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| $h; \tau$ | 0.1; 0.001 | 0.01; 0.001 |
| Число уравнений $2(N-1)$ в (10) | 18 | 198 |
| $\ z\ _{h,\tau}^{(1)}$ | 0.009 | 0.0097 |
| $\ z\ _{h,\tau}^{(2)}$ | 0.009 | 0.009 |
| $\ z\ _{h,\tau}^{(3)}$ | 0.009 | 0.011 |

2. Начально-краевая задача для двумерного волнового уравнения:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = LU + f(x,t), \quad \bar{D} = \{0 \leq x = (x_1, x_2) \leq 1, 0 \leq t \leq T\} = D + \Gamma, \quad (12)$$

$$U(x,0) = U_0(x), \quad \frac{\partial U(x,0)}{\partial t} = U_1(x), \quad 0 < x = (x_1, x_2) < 1, \quad (13)$$

$$U|_{\Gamma} = \mu(x,t), \quad 0 \leq t \leq T,$$

где $LU = L_1U + L_2U$, $L_\alpha U = \frac{\partial^2 U}{\partial x_\alpha^2}$, $\alpha = 1, 2$.

Введем сетку $\omega_{h\tau} = \{x_{ij} = (x_1^{(i)}, x_2^{(j)}); i, j = \overline{0, N}, h = 1/N; t_k = k\tau, k = \overline{0, M}, \tau = T/M\}$, и в узлах сетки сеточную функцию $y_{ij}^k = y(ih, jh, t_k)$.

Поставим в соответствие задаче (12)-(13) разностную схему с весами [1]

$$y_{it} = (\Lambda_1 + \Lambda_2)y^{(\sigma)} + \varphi, \quad (x,t) \in \omega_{h\tau}, \quad x = (x_1^{(i)}, x_2^{(j)}), \quad \omega_{h\tau} = \omega_{h\tau} + \gamma_{h\tau}, \quad (14)$$

$$y(x,0) = U_0(x), \quad y_t(x,0) = U_1(x) + 0,5\tau(LU(x,0) + f(x,0)) + O(\tau^2), \quad (15)$$

$$y|_{\gamma_h} = \mu(x,t),$$

где $\Lambda_\alpha y = y_{\bar{x}_\alpha x_\alpha}$, $\alpha = 1, 2$, $\varphi = f(x, t_k)$, $y^{(\sigma)} = \sigma y^{k+1} + (1-2\sigma)y^k + \sigma y^{k-1}$.

По аналогии с одномерным волновым уравнением вычислим погрешность аппроксимации

$$\psi = (\Lambda_1 + \Lambda_2)U^{(\sigma)} - U_{it} + \varphi.$$

При $\sigma=0$ получим явную схему, она условно устойчива при $\tau \leq h/\sqrt{2}$, $\psi=O(h^2+\tau^2)$, $z=O(h^2+\tau^2)$ [1]. При $\sigma < 1/4$ схема неявная, условно устойчива при $\tau \leq \left((1-4\sigma) \frac{2}{h^2} \right)^{-1/2}$. При $1/4 \leq \sigma \leq 1/2$ схема неявная, безусловно устойчива, $\psi=O(h^2+\tau^2)$, $z=O(h^2+\tau^2)$.

Исходную схему (14) можно переписать в виде

$$(E - \tau^2 \sigma (\Lambda_1 + \Lambda_2))y^{k+1} = [2E + \tau^2(1 - 2\sigma)(\Lambda_1 + \Lambda_2)]y^k - (E - \tau^2 \sigma (\Lambda_1 + \Lambda_2))y^{k-1} + \tau^2 \varphi. \quad (16)$$

Оператор $B = E - \tau^2 \sigma (\Lambda_1 + \Lambda_2)$ можно приближенно заменить факторизованным оператором C

$$C = (E - \tau^2 \sigma \Lambda_1)(E - \tau^2 \sigma \Lambda_2) = E - \tau^2 \sigma (\Lambda_1 + \Lambda_2) + \tau^4 \sigma \Lambda_1 \Lambda_2 = B + O(\tau^4). \quad (17)$$

Заменяя в (16) оператор B на C , получим факторизованную схему

$$(E - \tau^2 \sigma \Lambda_1)(E - \tau^2 \sigma \Lambda_2)y^{k+1} = [2E + \tau^2(1 - 2\sigma)(\Lambda_1 + \Lambda_2)]y^k - (E - \tau^2 \sigma (\Lambda_1 + \Lambda_2))y^{k-1} + \tau^2 \varphi. \quad (18)$$

Преобразуя факторизованную схему (18) к форме типа (14) и учитывая соотношение (17), получим

$$y_{it} = (\Lambda_1 + \Lambda_2)(\sigma y^{k+1} + (1 - 2\sigma)y^k + \sigma y^{k-1}) + \varphi - \tau^2 \sigma \Lambda_1 \Lambda_2 y^{k+1},$$

что отличается от схемы (14) на члены $O(\tau^2)$. Поскольку схема (14)-(15) имеет второй порядок аппроксимации, то факторизованная схема (18) также имеет аппроксимацию $O(\tau^2+h^2)$. Таким образом, из сказанного выше следует безусловная сходимость факторизованной схемы (18) со скоростью $\psi=O(h^2+\tau^2)$ при $1/4 \leq \sigma \leq 1/2$.

Решение разностных уравнений сводится к последовательности одномерных прогонок по направлениям x_1 и x_2 . В самом деле, факторизованный оператор C есть произведение одномерных трехточечных операторов $E - \tau^2 \sigma \Lambda_\alpha$, а каждый такой оператор обращается одномерной прогонкой, тем самым схема (18) экономична.

Так же, как в случае одномерного волнового уравнения, задачу (12)-(13) можно решить методом прямых с применением к системе дифференциально-разностных уравнений (количество уравнений равно $2(N-1)^2$) метода Рунге-Кутты четвертого порядка с аппроксимацией по пространственным переменным $x_1, x_2, O(|h^4|)$ и $O(|h^2|)$. Исследования на модельных задачах показали, что оптимальным является метод прямых с аппроксимацией по пространственным координатам $O(|h^4|)$.

Рассмотрим следующие модельные задачи, соответствующие точным решениям:

$$1a \quad U(x_1, x_2, t) = (x_1^2 + x_2^2)t^2 + 5(x_1 + x_2) + t, \quad \bar{D} = \{0 \leq x_1, x_2 \leq 1; 0 \leq t \leq 2\},$$

$$2a \quad U(x_1, x_2, t) = \exp(x_1, x_2, t), \quad \bar{D} = \{0 \leq x_1, x_2 \leq 1; 0 \leq t \leq 2\}.$$

При $h=0,1$ для аппроксимации $O(|h^4|)$ число уравнений $2(N-1)^2=2 \cdot 9^2=162$. При $h=0,05$ для аппроксимации $O(|h^2|)$ число уравнений $2(N-1)^2=2 \cdot 19^2=723$, т.е. число уравнений при аппроксимации $O(|h^2|)$ в 4,5 раз больше, чем для $O(|h^4|)$.

Из табл. 3 на основании проведенных исследований для волновых уравнений можно сделать вывод, что оптимальным является метод прямых с методом Рунге-Кутты 4-го порядка с аппроксимацией $\psi=O(h^4+\tau^4)$.

Влияние порядка аппроксимации на точность метода

| Метод одномерных прогонок $\psi=O(h^2+\tau^2)$ | | | | Метод Рунге-Кутта $\psi=O(h^2+\tau^4)$ | | | Метод Рунге-Кутта $\psi=O(h^4+\tau^4)$ | | |
|---|--------|------------------------|------------------------|---|--------|------------------------|---|--------|------------------------|
| h | τ | $\ z\ _{h,\tau}^{(1)}$ | $\ z\ _{h,\tau}^{(2)}$ | h | τ | $\ z\ _{h,\tau}^{(2)}$ | h | τ | $\ z\ _{h,\tau}^{(2)}$ |
| 0.01 | 0.01 | 0.05 | 0.01 | 0.1 | 0.001 | 0.002 | 0.1 | 0.001 | 0.0001 |
| 0.005 | 0.001 | 0.02 | 0.005 | 0.05 | 0.0005 | 0.0001 | 0.1 | 0.0005 | 0.00004 |

3. Начально-краевая задача для уравнения колебания пластинки:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} + \frac{\partial^4 U}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 U}{\partial x_1^2 \partial x_2^2} + \frac{\partial^4 U}{\partial x_2^4} = q(x_1, x_2, t), \tag{19}$$

$$\bar{D} = \{0 \leq x_1, x_2 \leq 1, 0 \leq t \leq T\} = D + \Gamma.$$

Начальные условия

$$U(x,0) = U_0(x), \frac{\partial U}{\partial t}(x,0) = U_1(x), 0 < x = (x_1, x_2) < 1. \tag{20}$$

Краевые условия двух видов (n – нормаль к Γ):

$$U|_{\Gamma} = \frac{\partial^2 U}{\partial n^2} \Big|_{\Gamma} = 0, \tag{21}$$

$$U|_{\Gamma} = \frac{\partial U}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = 0. \tag{22}$$

В предыдущих задачах сравнивались безусловно устойчивые неявные схемы с методом прямых решения дифференциально-разностных уравнений с использованием явного метода Рунге-Кутта 4-го порядка. Теперь сравним явные разностные схемы с аппроксимацией $\psi=O(h^2+\tau^2)$; $\psi=O(h^4+\tau^2)$ с методом прямых с погрешностью $\psi=O(h^2+\tau^4)$; $\psi=O(h^4+\tau^4)$.

Для аппроксимации на сетке $\bar{\omega}_{h\tau} = \{x_{ij} = (x_1^{(i)}, x_2^{(j)}), t_k = k\tau, i, j = \overline{0, N}, k = \overline{0, M}\}$ частных производных по пространственным переменным, входящим в уравнение (19), потребуется введение законтурных узлов, для схемы $\psi=O(h^2+\tau^2)$ – один ряд законтурных узлов, для схемы $\psi=O(h^4+\tau^2)$ – два ряда законтурных узлов, которые определяем из разностных аппроксимаций соответствующих краевых условий (21), (22). В случае двух законтурных узлов используем два вида разностных аппроксимаций: на симметричном и несимметричном шаблонах (5), (6). В результате аппроксимации на расширенной сетке

$$\bar{\omega}_{h\tau}^+ = \{x_{ij}, i, j = \overline{0, n}, n = N + l; t_k = k\tau, k = \overline{0, M}\} \quad (l=2 \text{ для схемы } O(h^2),$$

$l=4$ для схемы $O(h^4)$), получим систему явных разностных уравнений относительно сеточной функции $y_{ij}^{k+1} = y(x_1^{(i)}, x_2^{(j)}, t_{k+1})$.

$$\frac{y_{ij}^{k+1} - 2y_{ij}^k + y_{ij}^{k-1}}{\tau^2} = -(\Lambda_{x_1}^{(l)} y_{ij}^k + 2\Lambda_{x_1 x_2}^{(l)} y_{ij}^k + \Lambda_{x_2}^{(l)} y_{ij}^k) + q, \tag{23}$$

где $\Lambda_{x_1}^{(l)}, \Lambda_{x_1 x_2}^{(l)}, \Lambda_{x_2}^{(l)}$ – разностные операторы, аппроксимирующие частные производные в уравнении (19) с порядком $O(h^2)$ ($l=2$) либо $O(h^4)$ ($l=4$). Начальные условия аппроксимируем с порядком $O(\tau^2)$

$$y_{ij}^o = U_0(x_1^{(i)}, x_2^{(j)}) = U_0(i, j),$$

$$\frac{y_{ij}^1 - y_{ij}^0}{\tau} = U_1(i, j) + \frac{\tau}{2} (q(i, j, 0) - \nabla^4 U_0) + O(\tau^2), (i, j) = \overline{1, N-1}. \quad (24)$$

Краевые условия (21), (22) аппроксимируем на расширенной сетке $\overline{\omega}_{h\tau}^+$ с порядком $O(|h^2|)$ при $l=2$ и с порядком $O(|h^4|)$ при $l=4$. Так как схема (23) и (24) явная, условно устойчивая, выбор шага τ по переменной t осуществляем по правилу Рунге на последовательности сгущающихся сеток $(\tau, \tau/2, \tau/4, \dots)$; добиваемся совпадения решений с требуемой точностью на двух последовательных сетках. Сравнение явных разностных схем с порядком $O(|h^2| + \tau^2)$ и $O(|h^2| + \tau^2)$ проводим на модельных задачах, соответствующих точным решениям:

$$\left. \begin{aligned} 1б \quad U(x_1, x_2, t) &= \cos \pi t \sin \pi x_1 \sin \pi x_2; \\ 2б \quad U(x_1, x_2, t) &= (1+t) \sin \pi x_1 \sin \pi x_2; \end{aligned} \right\} \text{ для краевого условия (21)}$$

$$\left. \begin{aligned} 3б \quad U(x_1, x_2, t) &= \cos \pi t \sin^2 \pi x_1 \sin^2 \pi x_2; \\ 4б \quad U(x_1, x_2, t) &= (1+t)^2 \sin^2 \pi x_1 \sin^2 \pi x_2. \end{aligned} \right\} \text{ для краевого условия (22)}$$

Применяя метод прямых к задаче (19)-(21), получим систему дифференциально-разностных уравнений, которую решаем методом Рунге-Кутты 4-го порядка, при этом используем разностные операторы по пространственным переменным порядка $O(|h^2|)$ и $O(|h^4|)$. Здесь выбор шага τ также проводим на последовательности сгущающихся сеток $(\tau, \tau/2, \tau/4, \dots)$. Сравнение метода Рунге-Кутты с погрешностью аппроксимации $O(|h^2| + \tau^4)$ и $O(|h^4| + \tau^4)$ проводим на модельных задачах 1б-4б.

Результаты исследований приведены в табл. 4, 5.

Таблица 4

Влияние порядка аппроксимации на выбор шагов h и τ в явной схеме

| № задачи | Явная схема | | | | | | | |
|----------|-------------------|-----|----------|-------|-------------------|-----|---------|------|
| | $O(h^2 + \tau^2)$ | | | | $O(h^4 + \tau^4)$ | | | |
| | h | N | τ | M | h | N | τ | M |
| 1б | 0.02 | 50 | 0.00005 | 20000 | 0.1 | 10 | 0.0012 | 800 |
| 2б | 0.02 | 50 | 0.00005 | 20000 | 0.1 | 10 | 0.0006 | 1600 |
| 3б | 0.017 | 60 | 0.000035 | 28800 | 0.05 | 20 | 0.00015 | 6400 |
| 4б | 0.0125 | 80 | 0.00003 | 32400 | 0.05 | 20 | 0.00015 | 6400 |

Таблица 5

Влияние порядка аппроксимации на выбор шагов h и τ в методе Рунге-Кутты

| № задачи | Рунге-Кутта | | | | | | | |
|----------|-------------------|-----|---------|-------|-------------------|-----|--------|------|
| | $O(h^2 + \tau^4)$ | | | | $O(h^4 + \tau^4)$ | | | |
| | h | N | τ | M | h | N | τ | M |
| 1б | 0.02 | 50 | 0.0001 | 10000 | 0.1 | 10 | 0.0025 | 400 |
| 2б | 0.02 | 50 | 0.0001 | 10000 | 0.1 | 10 | 0.0025 | 400 |
| 3б | 0.017 | 60 | 0.00007 | 14400 | 0.05 | 20 | 0.0003 | 3200 |
| 4б | 0.014 | 70 | 0.00005 | 19600 | 0.05 | 20 | 0.0003 | 3200 |

Здесь погрешность на точном решении задается равной 0.001 при $T=1$. На основании проведенных исследований [7] сделан вывод, что оптимальным алгоритмом является метод Рунге-Кутты с невязкой $\psi=O(h^4+\tau^4)$, т.к. он позволяет брать более крупную сетку по h по сравнению с $O(h^2+\tau^4)$, что приводит к уменьшению порядка системы в 4,5 раза. Этот алгоритм был применен для решения более сложной задачи.

4. Уравнения движения гибких пластинок в кинематической гипотезе Кирхгофа:

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \varepsilon \frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{1}{12(1-\nu^2)} \nabla^2 \nabla^2 w + L(w, F) - P_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + q, \quad (25)$$

$$\nabla^2 \nabla^2 F = -\frac{1}{2} L(w, w).$$

В уравнении (25) $(x, y) \in \bar{G} = \{0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1\}$, $\lambda = 1, 0 \leq t \leq t_n$, $L(w, F)$ – известный нелинейный оператор

$$L(w, F) = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} - 2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \frac{\partial^2 F}{\partial x^2}.$$

Начальные условия:

$$w|_{t=0} = \varphi_1(x, y), \quad \left. \frac{\partial w}{\partial t} \right|_{t=0} = \varphi_2(x, y). \quad (26)$$

Выпишем для области $\{0 \leq x, y \leq 1\}$ один из вариантов краевых условий, при $x=0; 1$ ($x \leftrightarrow y$). Например, шарнирное опирание на гибкие нерастяжимые в касательной плоскости ребра:

$$w = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = F = \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} = 0, \quad x \leftrightarrow y. \quad (27)$$

Здесь выбор шага h по пространственным координатам и шага τ по времени в методе Рунге-Кутты осуществляется по правилу Рунге, т.е. добиваемся совпадения решения на сетке с шагом h и $h/2$, и соответственно с шагом τ и $\tau/2$. В результате этих экспериментов был выбран шаг $h=1/8$ и $\tau=0,0002$ в схеме повышенной точности.

5. Слабонелинейное многомерное уравнение теплопроводности

В [1] даны схемы второго и четвертого порядков точности для стационарного и нестационарного линейных уравнений теплопроводности. В [2] приведена схема второго порядка для слабонелинейного стационарного уравнения теплопроводности в прямоугольной области в случае первой краевой задачи. Доказана сходимость к решению дифференциальной задачи. В случае третьей краевой задачи методом аппроксимации квадратичного функционала в [3] построена разностная схема повышенной точности для стационарного линейного трехмерного уравнения теплопроводности с постоянными коэффициентами при старших и младших производных, показана сходимость к точному решению и эффективность на модельных задачах. Поэтому в данной работе мы ограничились рассмотрением первой краевой задачи. В [4] построены разностные схемы повышенной точности для многомерных линейных стационарных уравнений теплопроводности со смешанными производными, с переменными коэффициентами при младших и старших производных. В [5,6] построены разностные схемы повышенной точности для слабонелинейного стационарного многомерного уравнения теплопроводности и найден экономичный алгоритм решения систем нелинейных разностных уравнений.

В данной работе построены неявные схемы с весами и схема повышенной точности для многомерного слабонелинейного уравнения теплопроводности, на модельных задачах

выявлен экономичный алгоритм решения соответствующих нелинейных разностных уравнений – это метод переменных направлений для схемы повышенной точности.

В области $\bar{G} = \{0 \leq x_\alpha \leq l_\alpha, \alpha = 1, 2, 3\}$ и $0 \leq t \leq T$ рассмотрим слабонелинейное уравнение теплопроводности

$$\begin{aligned} \partial U / \partial t &= \sum_{\alpha=1}^3 \partial^2 U / \partial x_\alpha^2 - K_0(x, t, U, \partial U / \partial x), \quad x = (x_1, x_2, x_3) \in G, \quad t > 0, \\ \partial U / \partial x &= (\partial U / \partial x_1, \partial U / \partial x_2, \partial U / \partial x_3), \end{aligned} \quad (28)$$

с краевыми условиями первого рода $U(x, t)|_\Gamma = \mu(x, t)$, Γ – граница области G , и начальным условием $U(x, 0) = U_0(x)$ $x \in \bar{G}$.

Слабонелинейность уравнения (28) означает [2], что функция $K_0(x, t, p_0, p_1, p_2, p_3)$, где $p_0 = U$, $p_\alpha = \partial U / \partial x_\alpha$, $\alpha = 1, 2, 3$, определена при $x \in \bar{G}$, $t \in [0, T]$, $|p_0|, |p_1|, |p_2|, |p_3| < \infty$ и непрерывна по x, t при фиксированных $p_\alpha (\alpha = 0, 1, 2, 3)$, а также существуют производные от функции K_0 по p_α , которые удовлетворяют условиям

$$M_0 \geq \partial K_0 / \partial p_0 \geq 0, \quad |\partial K_0 / \partial p_\alpha| \leq M, \quad \alpha = 1, 2, 3.$$

5.1. Явная разностная схема. Введем прямоугольную равномерную сетку $\bar{\omega}_h = \{x_i = (i_1 h_1, i_2 h_2, i_3 h_3)\}$, $i_\alpha = \overline{0, N_\alpha}$, $h_\alpha = l_\alpha / N_\alpha$, $\alpha = 1, 2, 3$ и $\bar{\omega}_\tau = \{t_n = n\tau\}$, $n = \overline{0, m}$, $\tau = T/m$ и сеточную функцию $y = y^n = y(i_1 h_1, i_2 h_2, i_3 h_3, t_n)$. Перейдем к безындексным обозначениям, полагая $\mathcal{E} = y^{n+1}$, $y_t = (\mathcal{E} - y) / \tau$. Нижний индекс будем указывать только в том случае, если он отличен от $i_\alpha (\alpha = 1, 2, 3)$, например, $y_{\bar{x}_\alpha} = (y - y_{i_\alpha-1}) / h_\alpha$. Рассмотрим разностные операторы

$\Lambda_\alpha y = y_{\bar{x}_\alpha x_\alpha} = (y_{i_\alpha-1} - 2y + y_{i_\alpha+1}) / h_\alpha^2$, $\Lambda y = \sum_{\alpha=1}^3 \Lambda_\alpha y$. Поставим в соответствие задаче (28) разностную схему

$$y_t = \Lambda y - 0.5[K_0(x, t, y, y_{\bar{x}}) + K_0(x, t, y, y_x)], \quad y_x = (y_{x_1}, y_{x_2}, y_{x_3}). \quad (29)$$

Краевые и начальные условия выполняются точно. Непосредственно можно убедиться, что погрешность аппроксимации разностной схемы

$$\psi = \Lambda U - K_1(x, t, U, U_x) - U_t = O(|h^2| + \tau),$$

где

$$K_1(x, t, U, U_x) = 0.5[K_0(x, t, U, U_{\bar{x}}) + K_0(x, t, U, U_x)]. \quad (30)$$

Разностная схема (29) является явной и условно устойчивой ($\tau \leq h_2/6$, $h = \min h_\alpha$), требует малых шагов h и τ , поэтому применяется редко [1].

5.2. Схемы с весами. Рассмотрим неявную схему с весами для уравнения (28)

$$\begin{aligned} y_t &= \Lambda(\sigma \mathcal{E} + (1 - \sigma)y) + \varphi, \quad x \in \omega_h, \quad t \in \omega_\tau, \\ \varphi &= -\bar{K}_1 = -K_1(x, \bar{t}, \bar{y}, \bar{y}_x), \quad \bar{t} = t_n + \tau/2, \quad \bar{y} = y(x, \bar{t}). \end{aligned} \quad (31)$$

Для оценки порядка аппроксимации схемы (31) представим

$$\sigma \mathcal{E} + (1 - \sigma)U = (\mathcal{E} + U) / 2 + (\sigma - 0.5)\tau U_t, \quad U_t = \dot{U} + O(\tau^2), \quad \Lambda_\alpha \bar{U} = L_\alpha \bar{U} + h_\alpha^2 / 12 L_\alpha^2 \bar{U} + O(h_\alpha^4)$$

и вычислим невязку

$$\begin{aligned} \psi &= \Lambda(\sigma \mathcal{E} + (1 - \sigma)U) + \varphi - U_t = \Lambda(\mathcal{E} + U) / 2 + (\sigma - 0.5)\tau \Lambda U_t + \varphi - U_t = \\ &= (L\bar{U} - \bar{K}_1 - \dot{U}) + (\sigma - 0.5)\tau L\bar{U} + (\varphi + \bar{K}_1) + O(|h|^2 + \tau^2) = \\ &= (\sigma - 0.5)\tau L\bar{U} + (\varphi + \bar{K}_1) + O(|h|^2 + \tau^2), \quad \text{где } LU = \Delta U. \end{aligned}$$

Таким образом, $\psi = O(|h|^2 + \tau^2)$ при $\sigma = 0,5$, $\varphi = -\bar{K}_1$; $\psi = O(|h|^2 + \tau)$ при $\sigma \neq 0,5$, $\varphi = -\bar{K}_1$.
 Вместо схемы (31) можно рассматривать схемы с различными весами σ_α по направлениям x_α

$$y_t = \sum_{\alpha=1}^3 \Lambda_\alpha (\sigma_\alpha \mathfrak{F} + (1 - \sigma_\alpha) y) + \varphi, \quad \varphi = -\bar{K}_1. \quad (32)$$

5.3. Схема повышенной точности. Построим схему повышенной точности для уравнения (28). Покажем, что схема

$$y_t = \sum_{\alpha=1}^3 \Lambda_\alpha (\sigma_\alpha \mathfrak{F} + (1 - \sigma_\alpha) y) + \sum_{\alpha=1}^3 h_\alpha^2 / 12 \sum_{\beta \neq \alpha}^{1 \div 3} \Lambda_\alpha \Lambda_\beta y + \varphi, \quad (33)$$

где

$$\sigma_\alpha = 0.5 - h_\alpha^2 / (12\tau), \quad \varphi = -\left(\bar{K}_1 + \sum_{\alpha=1}^3 h_\alpha^2 / 12 \Lambda_\alpha \bar{K}_1 \right), \quad (34)$$

имеет погрешность аппроксимации $\psi = O(|h|^4 + \tau^2)$.

Запишем невязку

$$\psi = \sum_{\alpha=1}^3 \left(\Lambda_\alpha (\mathfrak{F} + U) / 2 + (\sigma_\alpha - 0,5) \tau \Lambda_\alpha U_t \right) + \sum_{\alpha=1}^3 h_\alpha^2 / 12 \sum_{\beta \neq \alpha}^{1 \div 3} \Lambda_\alpha \Lambda_\beta U + \varphi - U_t.$$

Учитывая, что

$$(\mathfrak{F} + U) / 2 = \bar{U} + O(\tau^2), \quad \Lambda_\alpha U_t = L_\alpha \dot{\bar{U}} + O(\tau^2 + h_\alpha^2), \quad L_1^2 \bar{U} = L_1 \dot{\bar{U}} - L_1 L_2 \bar{U} - L_1 L_3 \bar{U} + L_1 \bar{K}_1,$$

$$L_2^2 \bar{U} = L_2 \dot{\bar{U}} - L_2 L_1 \bar{U} - L_2 L_3 \bar{U} + L_2 \bar{K}_1, \quad L_3^2 \bar{U} = L_3 \dot{\bar{U}} - L_3 L_1 \bar{U} - L_3 L_2 \bar{U} + L_3 \bar{K}_1,$$

$$\dot{\bar{U}} - L \bar{U} + \bar{K} = 0,$$

получим

$$\psi = \sum_{\alpha=1}^3 \left[h_\alpha^2 / 12 + (\sigma_\alpha - 0,5) \tau \right] L_\alpha \dot{\bar{U}} + \left(\varphi + \bar{K}_1 + \sum_{\alpha=1}^3 h_\alpha^2 / 12 L_\alpha \bar{K}_1 \right) + O(\tau^2 + |h|^4).$$

Таким образом, $\psi = O(\tau^2 + |h|^4)$, если σ_α и φ взять согласно (34), при этом функция K_0 в уравнении (28) должна иметь непрерывные производные по x_α до четвертого порядка. Для вычисления $\Lambda_\alpha \bar{K}_1$ в (7), (30) используем формулы

$$\Lambda_\alpha \bar{K}_1 = (\bar{K}_1(i_\alpha - 1) - 2\bar{K}_1 + \bar{K}_1(i_\alpha + 1)) / h_\alpha^2,$$

где

$$\bar{K}_1(i_\alpha - 1) = \bar{K}_1((i_\alpha - 1)h_\alpha, \bar{t}_n, \bar{U}((i_\alpha - 1)h_\alpha), \bar{U}_{\bar{x}}(i_\alpha - 1)).$$

Исследования на модельных задачах показали, что такая разностная производная от нелинейной функции имеет второй порядок точности, что и требуется для схемы (33).

5.4. Экономичные алгоритмы. Для решения систем разностных уравнений (32), (33) на каждом временном слое t_n можно использовать метод матричной прогонки. Однако, он требует большого числа действий $O(n_0^4)$, где n_0 – число узлов сетки ω_h ($n_0 = N_3$, где $N = N_\alpha$, $\alpha = 1, 2, 3$). Поэтому непосредственное использование схем нецелесообразно. Каждая из схем (32), (33) может быть заменена схемой того же порядка аппроксимации, но требующей для определения \mathfrak{F} последовательного применения скалярной прогонки для трехточечного уравнения и затраты $O(n_0)$ арифметических действий. Такая схема называется экономичной – это метод переменных направлений. При ее написании используется

схема повышенной точности (33). Приведем схему переменных направлений для двумерного уравнения теплопроводности [2]:

$$\frac{\bar{y}-y}{\tau} = \sigma_1 \Lambda_1 \bar{y} + (1-\sigma_2)y + \sigma_1 \varphi^n, \quad \frac{\mathfrak{F}-\bar{y}}{\tau} = (1-\sigma_1)\Lambda_1 \bar{y} + \sigma_2 \Lambda_2 \mathfrak{F} + (1-\sigma_1)\varphi^n,$$

где $y = y(x, t_n)$, $\bar{y} = y(x, t_n + \tau/2)$, $\mathfrak{F} = y(x, t_{n+1})$, $x \in \omega_h$, $t_n \in \omega_\tau$.

Запишем краевые и начальные условия

$$y(x, 0) = U_0(x), \quad x \in \bar{\omega}_h, \quad \mathfrak{F} = \mu(t_{n+1}) \quad \text{при} \quad i_2 = 0, N_2, \quad \bar{y} = \bar{\mu} \quad \text{при} \quad i_1 = 0, N_1,$$

где

$$\bar{\mu} = \sigma_1 \mu^{n+1} + (1-\sigma_1)\mu^n - \tau \Lambda_2 (\sigma_1 \sigma_2 \mu^{n+1} - (1-\sigma_1)(1-\sigma_2)\mu^n),$$

$$\sigma_\alpha = 0,5 - h_\alpha^2 / (12\tau), \quad \varphi^n = -(\bar{K}_1 + h_1^2 / 12 \Lambda_1 \bar{K}_1 + h_2^2 / 12 \Lambda_2 \bar{K}_1).$$

Приведем одну из модельных задач, на которых проводились исследования.

$U(x_1, x_2, t) = t^2[(x_1 + 0,5)^2 + (x_2 + 0,5)^2] + 1$ – точное решение задачи (28) в двумерной области $\bar{G} = \{0 \leq x_\alpha \leq 1, \alpha = 1, 2\}$, $t \in [0, 1]$; этому решению соответствует $K_0 = -2t[(x_1 + 0,5)^2 + (x_2 + 0,5)^2] + 16(p-1)t^4 / (p_1^2 + p_2^2)$, где $p=U$, $p_\alpha = \partial U / \partial x_\alpha$. Для достижения точности 10^{-4} потребовалось для явной схемы в 370 раз больше действий, чем для схемы повышенного порядка точности, а для неявной схемы ($\sigma_1 = \sigma_2 = 1$) в 9 раз больше, чем для схемы повышенного порядка точности.

Вычислительные эксперименты на модельных задачах, для которых известны точные решения, показали, что самым экономичным алгоритмом является метод переменных направлений для схемы повышенной точности, т.к. позволяет использовать более крупную сетку и сокращает порядок системы на каждом временном слое в десятки раз по сравнению со схемой второго порядка, что очень важно при решении многомерных задач. Разработанные алгоритмы и комплекс программ представляет интерес для практики решения нестационарного слабонелинейного многомерного уравнения теплопроводности в прямоугольной области, т.к. требуют только задания функции K_0 , границ прямоугольной области и числа разбиений по пространственным и временной координатам.

Итак, на основании исследования целого ряда задач для математической физики можно сделать вывод, что использование разностных схем повышенной точности по пространственным координатам приводит к значительному сокращению порядка систем разностных уравнений на каждом временном слое, что особенно важно при решении многомерных задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1977. 580 с.
2. Самарский А.А., Николаев Е.С. Методы решения сеточных уравнений. М.: Наука, 1978. 244 с.
3. Вахлаева Л.Ф., Крысько В.А. Устойчивость гибких пологих оболочек в температурном поле // Прикладная механика. 1983. Т. 19. № 1. С. 16-23.
4. Вахлаева Л.Ф. Разностные схемы повышенной точности для эллиптических уравнений // Математика и ее приложения: Межвуз. сб. науч. тр. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1991. Вып. 2. С. 74-77.
5. Вахлаева Л.Ф., Вахлаева Т.В. Разностные схемы повышенной точности для слабонелинейного эллиптического уравнения и сравнение со схемами второго порядка точности / Саратов. гос. техн. ун-т. Саратов, 1996. 9 с. Деп. в ВИНТИ 24.09.96 № 2855-В96.

6. Вахлаева Л.Ф., Вахлаева Т.В., Павлова Е.А. Экономичные алгоритмы решения разностных краевых задач для эллиптических уравнений // Математика. Механика: Сб. науч. тр. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2001. Вып. 3. С. 21-23.

7. Вахлаева Л.Ф., Вахлаева Т.В., Назарьянц В.О. Исследование разностных схем второго и четвертого порядков точности для нестационарных уравнений математической физики // Математика. Механика: Сб. науч. тр. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2000. Вып. 2. С. 159-161.

Крысько Вадим Анатольевич –

доктор технических наук, Соросовский профессор,
Заслуженный деятель науки и техники РСФСР,
заведующий кафедрой «Высшая математика»
Саратовского государственного технического университета

Вахлаева Людмила Федоровна –

кандидат технических наук,
доцент кафедры «Математическая физика и вычислительная математика»
Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского

Молоденкова Татьяна Викторовна –

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Высшая математика»
Саратовского государственного технического университета

УДК 658.512

С.М. Лисовский

**ФОРМИРОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ЗНАНИЙ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ**

Проектирование технических объектов представляет собой сложный технологический процесс, направленный на получение проектных решений в форме технической документации. Основной технологической операцией этого процесса является творческий труд проектировщика, т.е. его мыслительная деятельность. Традиционно творческий процесс считается прерогативой самого проектировщика, а качество этого труда оценивается его знаниями и способностями. Соответственно, качество проектных решений также неразрывно связано с качеством труда проектировщика, которое в свою очередь зависит от его опыта.

S.M. Lisovskiy

**KNOWLEDGE MODELS FORMING FOR DESIGNING
OF ELECTRO-PLASMA TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT**

Technical objects design is a difficult technological complex focused on receiving design solutions in the form of technical documentations. The major part

of this technological process is the creative attitude of a designer i.e. his own unique approach. Traditionally creative process is the prerogative of a designer and the quality of that work estimated by his knowledge and capabilities. And the quality of designing accordingly is connected with the quality of a designer's work which depends on his experience.

Система проектирования технических объектов всегда имеет цель, направленную на решение проектных задач и повышение эффективности самого процесса проектирования. В связи с этим она должна быть управляемой, т.е. иметь орган управления. Традиционным органом управления системы проектирования является административный орган, который решает организационно-плановые и ресурсные задачи проектирования.

В данной работе под управлением понимается не административное управление, а процесс управления, направленный на формирование и преобразование знаний, необходимых для решения конкретных задач проектирования объектов предметной среды (в работе под предметной средой понимаются электроплазменные технологии и оборудование).

Проектирование технических объектов, в том числе электроплазменных технологий и оборудования, представляет собой сложный технологический процесс, направленный на получение проектных решений в форме технической документации. Основной технологической операцией этого процесса является творческий труд проектировщика, т.е. его мыслительная деятельность. Традиционно творческий процесс считается прерогативой самого проектировщика, а качество этого труда оценивается его знаниями и способностями. Соответственно, качество проектных решений также неразрывно связано с качеством труда проектировщика, которое в свою очередь зависит от его опыта.

Существенное повышение производительности и улучшение качества труда проектировщика связаны с включением в технологический процесс проектирования ЭВМ. Традиционная технологическая схема проектировщик-ЭВМ (человеко-машинная система) состоит в том, что ЭВМ выполняет рутинную работу, а проектировщик – творческую. Очевидно, деление процесса проектирования на рутинный и творческий имеет временный и субъективный характер. Будем придерживаться следующего подхода к определению этих видов работ. Любые проектные знания, направленные на получение решений, которые проектировщик может формализовать и представить в программном виде для реализации на ЭВМ, будем относить к рутинным. Те же знания, которые не удастся формализовать – являются творческими для проектировщика [1, 2].

Поскольку творческий процесс всегда связан с обучением и гибким мышлением для адаптации знаний к конкретным условиям решаемой задачи, несомненно, система управления процессом проектирования также должна обладать этими функциями. Среди разнообразных систем моделирования знаний человека в наибольшей мере требованиям адаптации и обучения отвечают модели экспертных систем [3]. Эти модели, опираясь на методы анализа, синтеза и моделирования, развитые в системологии, а также на логические методы рассуждений человека, представленные в форме логического оператора ЕСЛИ-ТО, дают возможность сравнительно простыми средствами программировать сложные проектные знания на ЭВМ.

С учетом изложенного на рис. 1 представлена структурная схема человеко-машинной экспертной системы, предназначенная для гибкого (адаптивного) управления процессом проектирования электроплазменных технологий и оборудования. Особенность предложенной системы управления состоит в том, что она предназначена для формирования и преобразования знаний проектировщика в форме проектных моделей знаний для решения научно-технических, технологических, конструкторских и ресурсных задач в процессе разработки электроплазменных технологий и оборудования (рис. 2).



Рис. 1. Структурные составляющие человеко-машинной экспертной системы управления

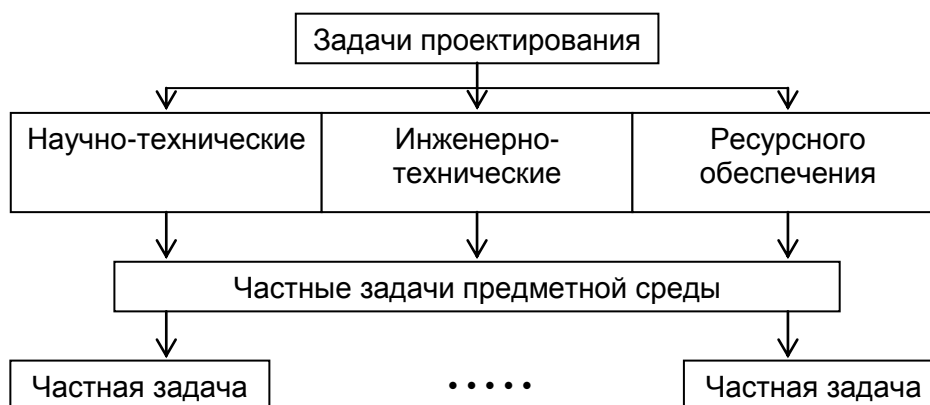


Рис. 2. Задача проектирования электроплазменных технологий и оборудования

Для унификации представлений и совместного использования знаний в человеко-машинной системе знания необходимо формализовать. Методической основой решения этой задачи является системный анализ, в качестве центральных вопросов в котором рассматриваются: моделирование, информация, управление (принятие решений).

Согласно излагаемому подходу, формализация управления процессом проектирования электроплазменных технологий и оборудования осуществляется на основе моделей знаний четырех видов (рис. 3). Первый вид представлен в форме информационно-справочных моделей, в которых обобщаются опыт и знания проектировщика по разнообразным техническим дисциплинам, относящимся к предметной среде проектирования. Эти модели являются

обучающими для проектировщика. На рис. 4 представлена структурная схема информационно-справочных моделей для формирования проектных моделей знаний предметной среды проектирования. Форма информационно-справочной модели представлена на рис. 5.

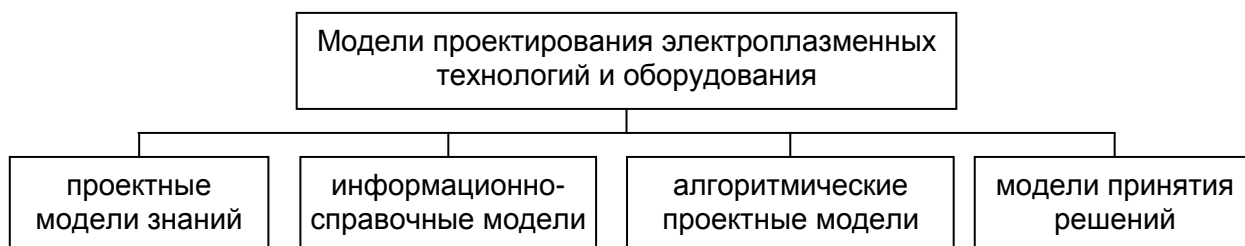


Рис. 3. Структурная схема моделей проектирования

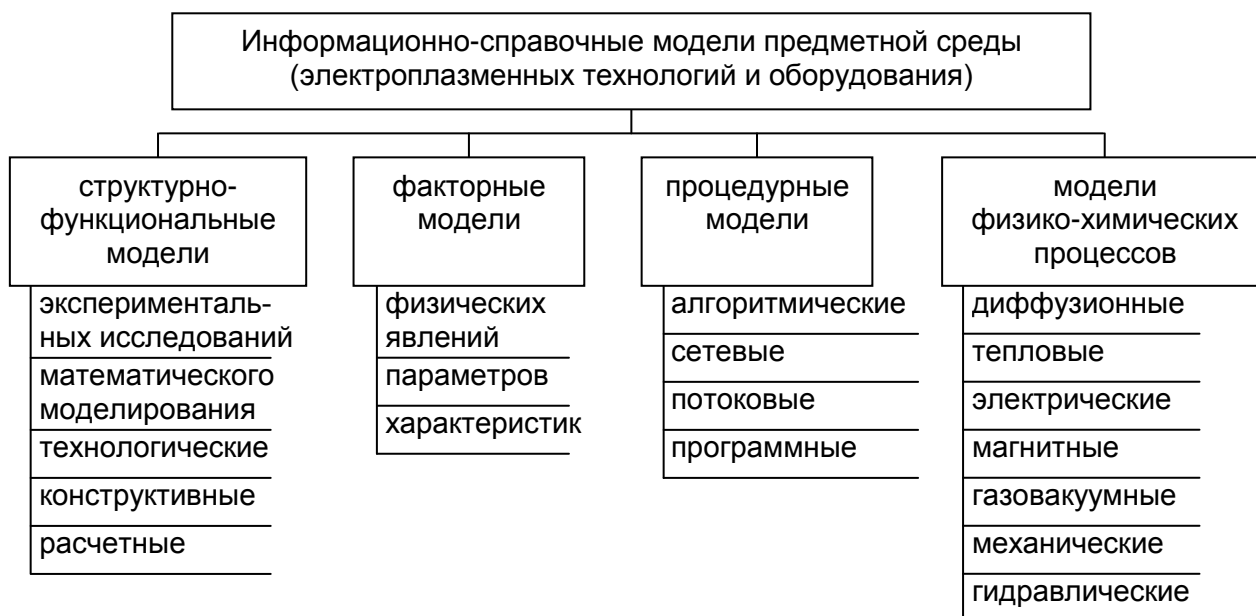


Рис. 4. Структурная схема информационно-справочных моделей предметной среды для формирования проектных моделей знаний

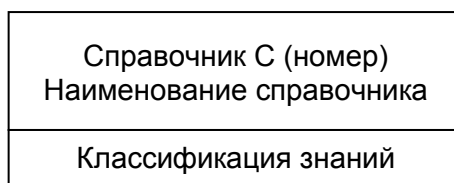


Рис. 5. Форма информационно-справочной модели

Пример выполнения информационно-справочных моделей приведен на рис. 6.

Технологический аспект проектирования реализуется в алгоритмизированных моделях последовательности решения проектных задач. При этом алгоритм проектирования выступает как процедурная модель, в состав которой входят модели двух типов: объектно-ориентированные проектные модели знаний и модели принятия решений (рис. 7).



Рис. 6. Информационно-справочная модель

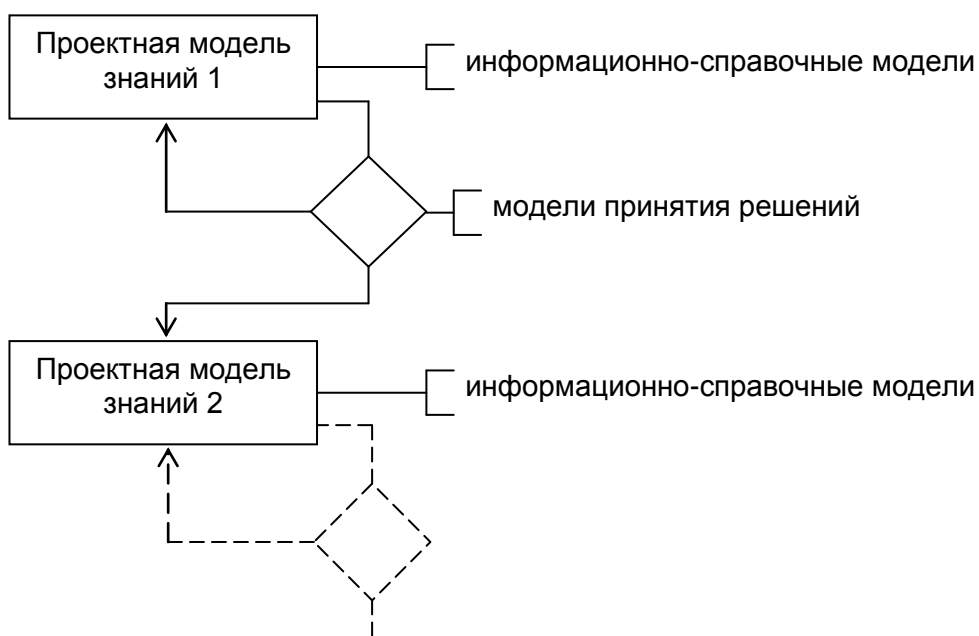


Рис. 7. Структурная схема алгоритмизированной модели последовательности решения проектных задач

Объектно-ориентированные проектные модели знаний формируются на основе информационно-справочных моделей в виде специальных выделенных информационных единиц для решения отдельных этапов проектной задачи в последовательности, предписываемой алгоритмом. Примеры алгоритмов для решения проектной задачи представлены на рис. 8.



Рис. 8. Схема алгоритма последовательности экспериментальных исследований

Модели принятия решений предназначены для моделирования рассуждений проектировщика о целях, критериях, методах, возможностях, достоверности, адекватности, других факторов, связанных с решением проектных задач.

Будем рассматривать задачу принятия решений, как процедуру преобразования входной информации, в качестве которой рассматриваются компоненты моделей знаний, их признаки, показатели и критерии, в выходную информацию, представляющую собой

решения проектировщика по результатам моделирования. Очевидно, что при такой постановке решается многокритериальная (векторная) задача оптимизации в условиях неопределенности. При этом под оптимальным понимается принятие проектного решения, которое по определенным соображениям проектировщика предпочтительнее других. Такой метод принятия решения (управления) будем именовать не оптимальным, а рациональным, поскольку оптимальное управление предполагает получение экстремального значения управляемой величины.

Модели принятия решений обеспечивают адаптивный характер управления процессом проектирования электроплазменных технологий и оборудования. В работе термин «адаптивное управление» трактуется как способность человеко-машинной системы достигать требуемой цели в условиях неопределенности на основе использования знаний проектировщика и информационных ресурсов ЭВМ.

Цели, методы и примеры решения проектных задач представлены в информационно-справочных моделях (рис. 9).

Сложность моделирования процесса принятия решений (управления) в условиях неопределенности обусловлена необходимостью представлять в формализованном виде рассуждения проектировщика по рассматриваемому вопросу проектной задачи, т.е. необходимостью формализации творческого процесса проектировщика. В работе для моделирования рассуждений проектировщика, связанных с принятием решения, используются аппарат теории вероятности нечетких моделей и методы экспертных систем [3-5].

Моделирование знаний нечеткими логическими высказываниями существенно упрощает задачу принятия решений за счет оцифровки качественных компонентов и использования разнообразных вероятностных и теоретико-множественных операторов для принятия решений.

Информационные модели для принятия решений в условиях неопределенности могут быть сформированы в форме матричных таблиц решений, продукционных правил ЕСЛИ <условия> ТО <решения>, игровых таблиц или сетевых комбинаций информационных структур. Процессы принятия решений связаны с процедурами сравнения компонентов информационного потока моделирования проектных задач по определенным признакам, показателям, критериям. Эти процедуры должны обеспечивать установление определенных количественных отношений между рассматриваемыми компонентами проектных моделей знаний. Математической основой процесса сравнения являются теория отношений и измерений. Таким образом, в процессе принятия решений необходимо осуществлять измерения информационных компонентов, находящихся в отношениях, предписываемых целями решаемых проектных задач.

В общем случае измерения могут быть объективными и субъективными, т.е. в качестве измерительной системы могут выступать как технические приборы, так и сам проектировщик. Измеренные компоненты могут иметь качественные или количественные значения, выраженные в различных физических единицах. Очевидно, что для процедуры сравнения разнообразных информационных компонентов необходимо использовать некоторые универсальные измерительные системы в виде шкал.

В работе в качестве универсальных измерительных шкал предлагается использовать функцию принадлежности, степень соответствия, вероятностную шкалу $[0 \div 1]$, процентную шкалу $[0 \div 100]$ и вербальную шкалу [малый, средний, большой и т.д.].

Наиболее удобной формой представления информационных моделей для принятия решений является двумерная табличная форма. На рис.10 в качестве примера приведена информационная модель для принятия решений, составленная на основе субъективных мнений проектировщика. В тех случаях, когда необходимо учитывать одновременно вероятностные величины и субъективное мнение, проектировщику предлагается применять информационную модель для принятия решений, представленную на рис. 11.

| | |
|---------|--|
| Позиции | Справочник С1 Цели решения проектных задач |
| П1 | Изучение физико-химических явлений |
| П2 | Определение существенных факторов явлений |
| П3 | Проверка соответствия между факторами |
| П4 | Изучение вероятностных распределений между факторами |
| П5 | Получение функциональных зависимостей |
| П6 | Изучение (анализ) поведения функциональных зависимостей |
| П7 | Получение числовых значений факторов |
| П8 | Разработка технологических процессов |
| П9 | Оптимизация технологических процессов |
| П10 | Совершенствование технологического оборудования и его систем |
| П11 | Автоматизация технологий и оборудования |
| П12 | Совершенствование методов проектирования |
| | Справочник С2 Методы решения проектных задач |
| П1 | Математическое моделирование |
| П2 | Экспериментальные исследования |
| П3 | Экспертные методы |
| П4 | Комбинирование |
| | Справочник С3 Признаки задачи относительно ресурсных затрат по ее решению |
| П1 | Сложность |
| П2 | Трудоемкость |
| П3 | Срочность |
| П4 | Важность |
| | Справочник С4 Признаки задачи относительно оценки результатов решения |
| П1 | Решение соответствует цели |
| П2 | Решение задачи закончено |
| П3 | Решение задачи необходимо продолжить |
| П4 | Изменить условия решения задачи |
| П5 | Перейти к решению следующей задачи |
| | Справочник С5 Признаки решения задачи |
| П1 | Достоверность результата |
| П2 | Существенность, значимость |
| П3 | Адекватность |
| П4 | Наличие корреляционной связи |
| П5 | Наличие функциональной связи |
| П6 | Наличие отношений между факторами |
| П7 | Тип функциональной связи |
| П8 | Характер функциональной связи |

Рис. 9. Информационно-справочные модели

| A | Вербальная шкала | | | |
|---------|------------------|---------|---------------|---------|
| | малый | средний | выше среднего | большой |
| Π_1 | X_1 | X_2 | X_3 | X_4 |
| Π_2 | X_5 | . | . | . |
| . | . | . | . | . |
| Π_m | | . | . | X_n |

Рис. 10. Матричная таблица для принятия решений на основе субъективного мнения проектировщика:

A – информация для принятия решений;

$\Pi = \{\Pi_i\} \quad i = \overline{1, m}$ – множество позиций информационно-справочных моделей;

$X = \{X_j\} \quad j = \overline{1, n}$ – множество значений компонентов Π

| A | S_1 | S_2 | | S_n |
|-------|----------|----------|-------|----------|
| | P_1 | P_2 | | P_n |
| a_1 | r_{11} | r_{12} | | r_{1n} |
| a_2 | r_{21} | r_{22} | | r_{2n} |
| . | . | . | | . |
| . | . | . | | . |
| a_m | r_{m1} | r_{m2} | | r_{mn} |

Рис. 11. Матричная таблица для принятия решений на основе вероятностных величин и субъективного мнения проектировщика:

$A = \{a_i\} \quad i = \overline{1, m}$ – множество альтернативных решений; $S = \{S_j\} \quad j = \overline{1, n}$ – множество условий

принятия решений; $P = \{P_j\} \quad j = \overline{1, n}$ – множество вероятностей выполнения условий S;

r_{ij} – количественное субъективное мнение проектировщика по поводу принимаемого решения

В теории принятия решений предлагаются следующие правила для принятия решений в условиях неопределенности:

Правило альтернативного выбора a_i

$$E[a_i] = \max \sum_{j=1}^n r_{ij} p(S_j) , \tag{1}$$

где $E[a_i]$ – значение критерия; r_{ij} – элемент матричной таблицы решений (рис. 11); $p(S_j)$ – вероятностное значение в матричной таблице решений.

Правило Лапласа

$$E[a_i] = \max \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_{ij} . \tag{2}$$

Правило минимакса (максимина)

$$E[a_i] = \min \max r_{ij} . \tag{3}$$

Правило Гурвица

$$E[a_i] = \max \{ \alpha \max r_{ij} + (1 - \alpha) \min r_{ij} \} , \tag{4}$$

где α – весовой коэффициент критерия.

Если знания проектировщика представлены в виде нечетких моделей знаний, для принятия решений предлагаются следующие правила:

Правило экспертного ранжирования

$$O = \tilde{A} \rightarrow \alpha > t_{nop} , \quad (5)$$

где $\tilde{A} = (X, Y, \tilde{F})$ – нечеткая информация в форме нечеткого соответствия или гиперграфа; $X = \{X_i\} (i = \overline{1, n})$ – помеченные элементы строки матрицы (или вершины гиперграфа); $Y = \{Y_j\} (j = \overline{1, m})$ – помеченные элементы столбцов матрицы или дуги гиперграфа (компоненты информационных справочников); $\tilde{F} = \left\| r_{ij} \right\|_{n \times m} (i = \overline{1, n}; j = \overline{1, m})$ – нечеткий график нечеткого соответствия; $r_{ij} = \delta_g \langle x_i, y_j \rangle (g = \overline{1, 6})$ – элементы матрицы.

$$\delta_g = \begin{cases} \delta_1 = 1 < \text{очень соответствует} > \\ \delta_2 = 0,8 < \text{соответствует} > \\ \delta_3 = 0,7 < \text{почти соответствует} > \\ \delta_4 = 0,5 < \text{более – менее соответствует} > \\ \delta_5 = 0,3 < \text{плохо соответствует} > \\ \delta_6 = 0,1 < \text{не соответствует} > \end{cases}$$

δ_g – степень соответствия субъективных высказываний эксперта; $\alpha = L/L_{\max}$ – относительные оценки экспертов; $L = \sum_1^n \delta_g$ – сумма оценок экспертов по столбцам матрицы r_{ij} ; t_{nop} – пороговый критерий.

Правило композиции

$$O = (\tilde{A}_1 \circ \tilde{A}_2) \rightarrow \alpha = \max \|r_{ij}\| , \quad (6)$$

где $\tilde{A}_1(X_1, Y_1, \tilde{F}_1)$ – нечеткая входная информация в форме нечеткого соответствия или гиперграфа; $\tilde{A}_2(X_2, Y_2, \tilde{F}_2)$ – нечеткая выходная информация в форме нечеткого соответствия или гиперграфа; X_1, X_2 – множество компонентов информационных справочников, отнесенных соответственно к входной и выходной информации; Y_1, Y_2 – множество вариантов экспертных оценок, соответственно входной и выходной информации; $\tilde{F}_1 \| a_{ik} \| (i = \overline{1, n}; k = \overline{1, l}), \tilde{F}_2 = \| b_{kj} \| (k = \overline{1, l}; j = \overline{1, m})$ – нечеткие графики соответственно входного и выходного соответствия; $a_{ik} = \delta_k \langle x_i, y_k \rangle, b_{kj} = \delta_g \langle x_k, y_j \rangle$ – соответственно элемент входной и выходной матриц.

Элементы матрицы r_{ij} вычисляются по следующему правилу

$$r_{ij} = \bigvee_k (a_{ik} \wedge b_{kj}) ,$$

где \vee, \wedge – соответственно операторы дизъюнкции и конъюнкции.

Правило нечеткого включения

$$O = \wedge (\mu_{A_1}(X) \rightarrow \mu_{A_2}(X)) > t_{nop} , \quad (7)$$

где $\mu_{A_1}(X), \mu_{A_2}(X)$ – функции принадлежности нечеткого множества X ; « \rightarrow » – операция импликации.

В тех случаях, когда решение принимается по результатам моделирования за определенное число этапов, в теории принятия решений предлагается модель динамического программирования марковских процессов.

$$\left\{ \begin{aligned} \phi_N(i) &= \max\{v_i^k\} \\ \phi_n(i) &= \max\left\{v_i^k + \sum_{j=0}^m p_{ij}^k \phi_{n+1}(j)\right\} \\ v_i^k &= \sum_{i=0}^m p_{ij}^k z_{ij}, \end{aligned} \right. \quad (8)$$

где $\phi_N(i)$ – суммарный ожидаемый доход; $\phi_n(i)$ – оптимальный ожидаемый доход на n -м этапе; v_i – ожидаемый доход при одноразовом переходе; p_{ij} – элемент матрицы переходных вероятностей; k – возможные стратегии поведения (альтернативы); z_{ij} – элемент матрицы доходов.

На рис. 12 представлена структурно-функциональная организация информационных и аппаратных средств для реализации предлагаемой методики проектирования электроплазменных технологий и оборудования на основе проектных моделей знаний.

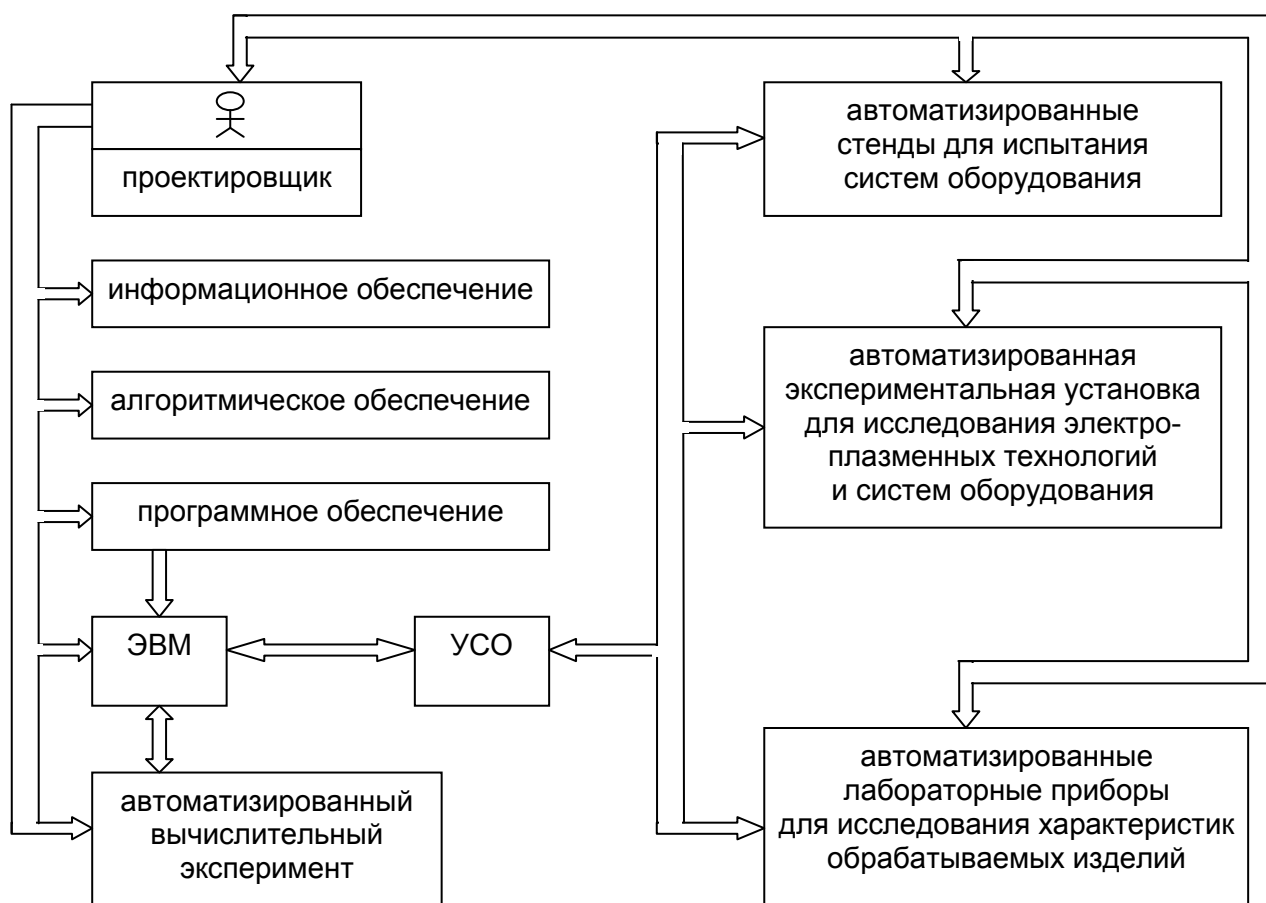


Рис. 12. Структурно-функциональная организация информационных и аппаратных средств для проектирования электроплазменных технологий и оборудования

Предлагаемые методические основы управления формированием проектных моделей знаний для проектирования электроплазменных технологий и оборудования направлены на повышение эффективности проектных работ за счет компьютеризации сложных знаний проектировщика.

ЛИТЕРАТУРА

1. Таран В.М., Лисовский С.М. Система адаптивного проектирования вакуумно-плазменных технологий и автоматизированного оборудования // Управление и вычислительные комплексы в машино- и приборостроении: Межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 1999. С. 96-99.
2. Евгеньев Г.Б. Системология инженерных знаний. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 376 с.
3. Малышев Н.Г., Бернштейн Л.С., Боженюк А.В. Нечеткие модели для экспертных систем в САПР. М.: Энергоатомиздат, 1991. 272 с.
4. Таха Х. Введение в исследование операций: Пер. с англ. М.: Мир, 1985. 604 с.
5. Лисовский С.М., Таран В.М., Гусев Н.А. Управление формированием проектных моделей знаний для проектирования электроплазменных технологий и оборудования // Динамика технологических систем: Сб. тр. VII Междунар. конф. Саратов: СГТУ, 2004. С. 255-258.

Лисовский Сергей Михайлович –

кандидат технических наук, вице-губернатор,
первый заместитель председателя правительства Саратовской области

УДК 531.36

Н.Н. Макеев

ДВИЖЕНИЕ ТВЕРДОГО ТЕЛА С ДВУХСТЕПЕННЫМ ШАРНИРОМ В ПОТЕНЦИАЛЬНОМ ПОЛЕ

Исследуется движение абсолютно твердого тела, скрепленного с неподвижным основанием двухстепенным шарниром, в однородном потенциальном поле, силовые линии которого направлены параллельно неподвижной оси шарнира.

Рассматриваются случаи интегрируемости динамических уравнений тела, определяется характер малых движений в окрестности его положения равновесия, находятся условия устойчивости равновесия по линейному приближению. Получены условия существования стационарного движения тела и его устойчивости в потенциальном поле. Проведено редуцирование уравнений движения. Исследованы в линейном приближении бифуркации отсложения инвариантных многообразий стационарных состояний тела при воздействии на него гироскопических сил.

N.N. Makeyev

THE MOVEMENT OF A SOLID BODY WITH TWO-DEGREE ARTICULATION JOINT IN A CONSERVATIVE FIELD

The article deals with the movement of an absolutely solid body with two-degree articulation joint in the homogeneous conservative field of forces. The

lines of forces activity are parallel to the immovable axis of the articulation joint for this field.

The properties the integration of dynamic's equations of a solid body, its small movements in the neighborhood of stable equilibrium position. The conditions of stable equilibrium for linear approximation were discovered. The conditions of the stationary movement of the body and its of stability in the conservative field were received. The order of differential equations movement system was reduced. The research of bifurcation invariant of manifolds of a solid body stationary position under the influence of gyroscopic forces was carried out.

Введение

Динамический анализ движения твердого тела с двухстепенным шарнирным закреплением в силовом поле является составной частью формализованного описания действия механических звеньев роботосистем. К узлам таких систем относятся, в частности, манипуляционные захваты и конструкционно близкие им узлы*. В связи с этим, вопросы, решаемые в поставленной здесь задаче, представляют практический интерес. Полученные результаты позволяют оценить динамические нагрузки, возникающие при различных режимах движения систем с шарнирными закреплениями, а также определить области локальной устойчивости. Этим и обусловлена актуальность темы данной работы.

1. Основные предпосылки

Рассмотрим пространственное движение абсолютно твердого тела, связанного с неподвижным твердым основанием идеальным (без трения) двухстепенным шарниром со взаимно перпендикулярными осями.

Введем правые координатные ортореперы: неподвижный OX_i и подвижный Ox_i ($i=1,2,3$), неизменно связанный с твердым телом. Неподвижный полюс O находится в точке пересечения осей шарнира; оси Ox_3 , Ox_1 направлены по неподвижной и подвижной оси шарнира, соответственно. Ориентация подвижного репера относительно неподвижного определяется углами α , β , заключенными между осями Ox_1 , Ox_1 , а также между осью Ox_2 и плоскостью Ox_1x_2 , соответственно.

Применяя стандартную матрицу перехода от неподвижного орторепера к подвижному [1], можно выразить элементы матрицы данной задачи через углы α , β , принимаемые в дальнейшем за обобщенные координаты ($q_1=\alpha$, $q_2=\beta$).

Твердое тело движется в потенциальном силовом поле, в общем случае любой природы, характеризуемым силовой функцией $U(\alpha, \beta)$ из класса $C^1(\alpha, \beta)$. Уравнения движения в форме Лагранжа имеют вид

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0 \quad (i=1, 2), \quad (1)$$

где функция Лагранжа $L = T(\beta, \dot{\alpha}, \dot{\beta}) + U(\alpha, \beta)$, а кинетическая энергия твердого тела

$$T = \frac{1}{2} \left[P(\beta) \dot{\alpha}^2 + A_{11} \dot{\beta}^2 \right] - Q(\beta) \dot{\alpha} \dot{\beta}. \quad (2)$$

* Здесь и всюду далее верхние номера ссылок относятся к соответствующим номерам пунктов комментария.

Здесь и всюду далее точка сверху обозначает дифференцирование по времени t . В равенстве (2) обозначено

$$P(\beta) = A_{22} \sin^2 \beta + A_{33} \cos^2 \beta - A_{23} \sin 2\beta, \quad (3)$$

$$Q(\beta) = A_{12} \sin \beta + A_{13} \cos \beta,$$

где A_{ij} ($i, j=1, 2, 3$) – элементы матрицы тензора инерции твердого тела, отнесенного к полюсу O .

2. Постановка задачи

Динамическая система (ДС) (1) в силу выражения (2) в координатах α, β принимает вид

$$P(\beta)\ddot{\alpha} - Q(\beta)\ddot{\beta} + P'(\beta)\dot{\alpha}\dot{\beta} - Q'(\beta)\dot{\beta}^2 = U_\alpha, \quad (4)$$

$$A_{11}\ddot{\beta} - Q(\beta)\ddot{\alpha} - \frac{1}{2}P'(\beta)\dot{\alpha}^2 = U_\beta.$$

Здесь и всюду далее U_α, U_β – частные производные от U по α, β ; штрих обозначает дифференцирование по β .

Система уравнений (4) обладает интегралом энергии

$$V_1 \equiv \frac{1}{2} \left[P(\beta)\dot{\alpha}^2 + A_{11}\dot{\beta}^2 \right] - Q(\beta)\dot{\alpha}\dot{\beta} - U(\alpha, \beta) = h. \quad (5)$$

Для ДС (4) ставится ограниченная задача: определить ограничения, налагаемые на структурно-динамические параметры твердого тела и структуру силового поля, при которых данная ДС интегрируема в квадратурах. Поскольку ДС (4) является гамильтоновой с функцией Гамильтона V_1 , то, согласно теореме Бура – Лиувилля [3], эта система интегрируема в квадратурах, если существует ее первый интеграл, дополнительный по Уиттекеру [4] к интегралу энергии (5) и находящийся с ним в инволюции. Сходная по постановке задача рассмотрена в работе [5] для однородного поля силы тяжести.

Таким образом, поставленная задача в общем случае сводится к нахождению первого дополнительного алгебраического по $\dot{\alpha}, \dot{\beta}$ интеграла ДС (4), если он существует, и доказательству его инволютивности совместно с интегралом энергии. Помимо этого, в некоторых частных случаях решение данной задачи может достигаться редуцированием ДС (4) к некоторому определяющему уравнению.

3. Интегрирование основной динамической системы

Рассмотрим случаи интегрирования ДС (4) в квадратурах, при которых существуют ее дополнительные первые интегралы. Полагая

$$A_{22} = A_{33}, \quad A_{23} = 0, \quad (6)$$

приведем ДС (4) и ее интеграл (5) к виду

$$\frac{d}{dt} \left[A_{33}\dot{\alpha} - Q(\beta)\dot{\beta} \right] = U_\alpha, \quad A_{11}\ddot{\beta} - Q(\beta)\ddot{\alpha} = U_\beta, \quad (7)$$

$$\frac{1}{2} \left(A_{33}\dot{\alpha}^2 + A_{11}\dot{\beta}^2 \right) - Q(\beta)\dot{\alpha}\dot{\beta} - U(\alpha, \beta) = h. \quad (8)$$

Из первого уравнения ДС (7) следует, что в случае, когда $U=U(\beta)$, выражение, находящееся в квадратных скобках, является первым интегралом данной ДС. Этим характерным свойством обладает и в общем случае, вне условий (6), первое уравнение ДС (4).

3.1. Силовое поле с потенциалом $U=U(\beta)$

В силовом поле с потенциалом данного вида ДС (4) интегрируема по Лиувиллю (термин [6]). В этом случае величина V_1 не зависит от угла α и, следовательно, обобщенная координата α – циклическая. В силу этого обобщенный импульс $V_2 = \partial L / \partial \dot{\alpha}$, соответствующий координате α , есть первый интеграл ДС (4), который следует также из первого уравнения данной системы

$$V_2 \equiv P(\beta)\dot{\alpha} - Q(\beta)\dot{\beta} = H, \quad (9)$$

где $H = \text{const}$. Равенство (9) является интегралом проекции кинетического момента тела на ось Ox_3 , полученным в работе [5] для частного случая – однородного гравитационного поля.

Наличие первых интегралов (5), (9), находящихся в инволюции, позволяет свести интегрирование ДС (4) к квадратурам².

Исключая из равенств (5), (9) величину $\dot{\alpha}$, получаем

$$t - t_0 = \pm \int_{\beta_0}^{\beta} \sqrt{G_1(s)} ds, \quad (10)$$

где

$$G_1(\beta) = K(\beta) \{ 2P(\beta)[U(\beta) + h] - H^2 \}^{-1}, \quad K(\beta) = A_{11}P(\beta) - Q^2(\beta), \quad (11)$$

причем $\beta_0 = \beta(t_0)$. Знак в правой части равенства (10) должен совпадать со знаком величины $\dot{\beta} \neq 0$ или со знаком функции

$$\delta(\beta) = 2P^2(\beta)U'(\beta) + H^2P'(\beta) \neq 0$$

при $\dot{\beta} = 0$. Если $\dot{\beta} = \delta = 0$, то данная ДС стационарна по координате β . Квадратурное равенство (10) неявно определяет зависимость вида $\beta = \beta(t)$.

Постулируя обратимость зависимости (10), (11), в силу интеграла (9) получаем

$$\alpha = \alpha_0 + \int_{t_0}^t \left[H \pm \frac{Q(r)}{\sqrt{G_1(r)}} \right] \frac{d\tau}{P(r)}. \quad (12)$$

Здесь $r = \beta(t)$ – функция, полученная обращением зависимости (10); $\alpha_0 = \alpha(t_0)$.

Таким образом, равенство (12) и обращенная зависимость (10), (11) определяют полное решение поставленной задачи.

Другой случай интегрируемости ДС (4) для потенциала данного вида имеет место при условиях (6), когда второе уравнение ДС (4) в силу интеграла (9) приводится к виду

$$K(\beta)\ddot{\beta} + \frac{1}{2}K'(\beta)\dot{\beta}^2 = A_{33}U'(\beta). \quad (13)$$

Здесь, согласно условиям (6), $K(\beta) = A_{11}A_{33} - Q^2(\beta)$.

Для ДС (13) при $\dot{\beta} \neq 0$ существует первый интеграл

$$K(\beta)\dot{\beta}^2 = C + 2A_{33}U(\beta), \quad (14)$$

где $C = K_0 \dot{\beta}_0^2 - 2A_{33}U_0$, а $K_0, U_0, \dot{\beta}_0$ соответствуют значениям t_0, β_0 . Из равенства (14) следует

$$t - t_0 = \pm \int_{\beta_0}^{\beta} \sqrt{G_2(s)} ds, \quad (15)$$

где

$$G_2(\beta) = K(\beta)[C + 2A_{33}U(\beta)]^{-1}, \quad (16)$$

а значения β ограничены условием

$$U(\beta) \neq U_0 - (2A_{33})^{-1} K_0 \dot{\beta}_0^2.$$

Полагая, что зависимость, определяемая соотношениями (15), (16), обратима, в силу интеграла (9) получаем равенство вида (12), в котором величина G_1 заменена на G_2 согласно выражению (16).

Таким образом, ДС (4) интегрируема в квадратурах для принятых ограничений не только в случае однородного поля силы тяжести [5], но и для произвольного потенциального поля любой природы.

3.2. Маятниковое движение в однородном силовом поле

Совместим оси репера Ox_i с главными в полюсе O осями инерции твердого тела. Тогда $A_{ij} = A_i, A_{ij} = 0$ ($i, j = 1, 2, 3; i \neq j$) и ДС (4), а также интеграл энергии (5) принимают вид

$$P(\beta)\ddot{\alpha} + P'(\beta)\dot{\alpha}\dot{\beta} = U_\alpha, \quad A_1\ddot{\beta} - \frac{1}{2}P'(\beta)\dot{\alpha}^2 = U_\beta, \quad (17)$$

$$P(\beta)\dot{\alpha}^2 + A_1\dot{\beta}^2 - 2U(\alpha, \beta) = 2h, \quad (18)$$

где, согласно (3),

$$P(\beta) = A_2 \sin^2 \beta + A_3 \cos^2 \beta, \quad P'(\beta) = (A_2 - A_3) \sin 2\beta. \quad (19)$$

Из интегралов (9), (18) следует

$$A_1\dot{\beta}^2 = 2[U(\beta) + h] - H^2 P^{-1}(\beta) \equiv A_1 \Phi(\beta),$$

$$t - t_0 = \pm \int_{\beta_0}^{\beta} [\Phi(s)]^{-1/2} ds. \quad (20)$$

Наличие квадратуры (20) при возможности ее обращения приводит в силу интеграла (9) к явной зависимости вида $\alpha(t)$.

Полагая

$$A_2 = A_3, \quad (21)$$

приведем уравнения ДС (17) и интеграл (18) к виду

$$A_3\ddot{\alpha} = U_\alpha, \quad A_1\ddot{\beta} = U_\beta, \quad (22)$$

$$A_3\dot{\alpha}^2 + A_1\dot{\beta}^2 - 2U(\alpha, \beta) = 2h. \quad (23)$$

Интеграл (23) непосредственно следует и из равенства (8)³.

Представим потенциал U для ДС (17) в виде тригонометрического полинома

$$U(\alpha, \beta) = a_{11} \cos \alpha + a_{12} \sin \alpha + a_{23} \sin \beta + a_{33} \cos \beta + \\ + (a_{21} \sin \alpha + a_{22} \cos \alpha) \cos \beta + (a_{31} \sin \alpha + a_{32} \cos \alpha) \sin \beta, \quad (24)$$

где a_{ij} ($i, j=1, 2, 3$) – заданные постоянные параметры, связанные с характеристиками силового поля. Выражению (24) можно поставить в соответствие матрицу коэффициентов $\mathbf{A} = [a_{ij}]$ (3×3), в которой $a_{13}=0$. Такое представление отражает структуру принятой модели силового поля⁴.

Пусть при условии (21) $U=U(\alpha)$. Тогда для выражения потенциала (24) имеем

$$a_{11} a_{12} \neq 0, \quad a_{ij} = 0 \quad (i = 2, 3; j = 1, 2, 3). \quad (25)$$

Условия (21), (25) соответствуют обобщенной структурно-динамической симметрии твердого тела по Лагранжу [10] и структурной симметрии силового поля.

Обозначая

$$a_{11} = A_3 n \cos \gamma, \quad a_{12} = A_3 n \sin \gamma, \quad n = A_3^{-1} \sqrt{a_{11}^2 + a_{12}^2},$$

представим ДС (22) в виде

$$\ddot{\alpha} + n \sin(\alpha - \gamma) = 0, \quad \ddot{\beta} = 0. \quad (26)$$

Полагая $\theta = \alpha - \gamma$, приведем первое уравнение (26) и интеграл (23) к форме

$$\ddot{\theta} + n \sin \theta = 0, \quad (27)$$

$$\dot{\theta}^2 - 2n \cos \theta = 2h_1,$$

где

$$h_1 = A_3^{-1} \left(h - \frac{1}{2} A_1 \dot{\beta}_0^2 \right).$$

Угол γ определяется по заданным начальным значениям из равенства

$$2n \cos(\alpha_0 - \gamma) = \dot{\alpha}_0^2 + A_3^{-1} \left(A_1 \dot{\beta}_0^2 - 2h \right).$$

Равенство (27) является уравнением маятникового типа для силового поля с потенциалом (24) при условиях (25). В частности, для случая однородного поля силы тяжести отсюда получаем уравнение [10, 11]. Уравнение (27) интегрируется в эллиптических функциях для любого режима движения ([4, с.87]; [10, с.217]).

Согласно второму уравнению ДС (26)

$$\beta = \dot{\beta}_0 t + \beta_0. \quad (28)$$

Таким образом, движение твердого тела в силовом поле с потенциалом (24) при условиях (21), (25) является суперпозицией вибрационного движения по углу α с периодом $T = 2\pi/\sqrt{n}$ и равномерного вращения по углу β , определяемому равенством (28).

4. Малые движения

Если положение равновесия (ПР) ДС (17)

$$(\alpha, \beta) = (\alpha_*, \beta_*), \quad \left(\dot{\alpha}, \dot{\beta} \right) = (0, 0) \quad (29)$$

существует, то имеет место система условий

$$U_\alpha = U_\beta = 0 \quad \text{при} \quad \alpha = \alpha_*, \beta = \beta_*$$

Для дальнейшего постулируются следующие предпосылки.

1. Существуют малые по α, β движения ДС (17) в окрестности δ_0 ее положения $\alpha = \beta = 0$.
2. Положение равновесия (29) содержится внутри окрестности δ_0 .
3. В заданной окрестности $\delta_* \subset \delta_0$ ПР (29) существуют малые по p_1, p_3 (одинакового порядка малости) движения данной ДС, где отклонения

$$p_1 = \alpha - \alpha_*, \quad p_3 = \beta - \beta_*, \quad (30)$$

такие, что $0 < |p_i| < \varepsilon_i \leq \varepsilon$ ($i=1,3$), $\varepsilon = \max(\varepsilon_1, \varepsilon_3)$. Здесь $\varepsilon_1, \varepsilon_3$ – заданные числа, определяющие окрестность δ_* .

Рассмотрим малые угловые движения твердого тела в окрестности δ_0 при воздействии на него силового поля с потенциалом (24). Выражение (24) в δ_0 – окрестности представимо в виде

$$U(\alpha, \beta) = -\frac{1}{2}(n_1 \alpha^2 + n_3 \beta^2) + a_{31} \alpha \beta + m_1 \alpha + m_3 \beta + Sp \mathbf{A}, \quad (31)$$

где

$$\begin{aligned} n_1 &= a_{11} + a_{22}, & n_3 &= a_{22} + a_{33}, \\ m_1 &= a_{12} + a_{21}, & m_3 &= a_{23} + a_{32}, & Sp \mathbf{A} &= a_{11} + a_{22} + a_{33}. \end{aligned}$$

Линеаризуя уравнения ДС (17), в силу равенства (31) получаем

$$A_3 \ddot{\alpha} + n_1 \alpha - a_{31} \beta = m_1, \quad A_1 \ddot{\beta} - a_{31} \alpha + n_3 \beta = m_3, \quad (32)$$

где n_1, n_3, a_{31} – коэффициенты жесткости (квазиупругости) данной системы осцилляторов [12], $n_1 n_3 \neq 0$. При

$$a_{31} = 0 \quad (33)$$

ДС (32) распадается на два независимых линейных осциллятора.

Если

$$\Delta = n_1 n_3 - a_{31}^2 \neq 0, \quad (34)$$

то ПР (29) для ДС (32) определяется равенствами

$$\alpha_* = \Delta^{-1}(m_1 n_3 + m_3 a_{31}), \quad \beta_* = \Delta^{-1}(m_3 n_1 + m_1 a_{31}). \quad (35)$$

В частности, при условиях (33), (34) имеем $\alpha_* = m_1 / n_1, \quad \beta_* = m_3 / n_3$.

Пусть выполняются условия кососимметричности матрицы \mathbf{A} : $m_1 = m_3 = 0$. В силу соотношения (31) эти условия представимы в виде

$$U_\alpha = U_\beta = 0 \quad \text{при} \quad \alpha = \beta = 0. \quad (36)$$

В этом случае ПР (29) совпадает с началом $\alpha = \beta = 0$, что соответствует нулевому положению равновесия (НПР) ДС (32).

В отклонениях (30) ДС (32) имеет вид

$$\ddot{\mathbf{p}} + \mathbf{B} \mathbf{p} = 0, \quad \mathbf{p} = [p_1 p_3]^T, \quad \mathbf{B} = [b_{ij}] \quad (i, j = 1, 2), \quad (37)$$

где элементы матрицы \mathbf{B}

$$b_{11} = v_1^2, \quad b_{12} = -A_3^{-1} a_{31}, \quad b_{21} = -A_1^{-1} a_{31}, \quad b_{22} = v_3^2.$$

Здесь v_1, v_3 – парциальные частоты данной ДС, существующие при $n_1 > 0, n_3 > 0$, равные

$$v_1 = \sqrt{\frac{n_1}{A_3}}, \quad v_3 = \sqrt{\frac{n_3}{A_1}}.$$

Характеристическое уравнение ДС (37) есть

$$\Omega^2 + (b_{11} + b_{22})\Omega + b_{11}b_{22} - b_{12}b_{21} = 0, \quad (38)$$

где $\Omega = \lambda^2$; λ – характеристический показатель⁵.

При условии (33) ДС (37) распадается на два независимых свободных линейных осциллятора

$$\ddot{p}_j + v_j^2 p_j = 0 \quad (j = 1, 3), \quad (39)$$

каждый из которых является гармоническим при $n_1 > 0, n_3 > 0$, соответственно. Характерно, что условие (33) имеет место при внутреннем резонансе

$$\Omega_1 = \Omega_3, \quad (40)$$

где Ω_1, Ω_3 – действительные корни уравнения (38).

Исследуем характер малых движений, совершаемых системой осцилляторов (37) в δ^* – окрестности ее ПР (29). К такого рода движениям относятся и малые колебания осцилляторов относительно данного ПР. Как известно [14], эти колебания характеризуются настолько малыми амплитудами, что при этом возбуждаются только основные частоты, тогда как более высокие гармоники практически не проявляются. Малые колебания могут совершаться как в резонансном, так и в нерезонансном режимах.

Условие существования внутреннего резонанса (40) в системе осцилляторов (37), представимое согласно уравнению (38) в виде

$$D \equiv (b_{11} - b_{22})^2 + 4b_{12}b_{21} = 0, \quad (41)$$

приводит к соотношениям

$$v_1^2 = v_3^2, \quad a_{31} = 0, \quad (42)$$

из которых последнее – условие (33).

Кратные корни характеристического уравнения (38) в силу соотношений (42) есть

$$(\lambda_{12}, \lambda_{34}) = \pm i v_1 = \pm i v_3, \quad (43)$$

где i – мнимая единица. Отсюда в резонансном режиме, существующем при условиях (42), малыми движениями осцилляторов (37) для $n_1 > 0, n_3 > 0$ являются незатухающие колебания, происходящие вблизи их ПР. Такого же рода малые движения данные осцилляторы совершают и в нерезонансном режиме.

В нерезонансном режиме согласно уравнению (38)

$$(\Omega_1, \Omega_3) = \frac{1}{2} \left[-(b_{11} + b_{22}) \pm \sqrt{D} \right],$$

где D – дискриминант (41), представимый в виде

$$D = (v_1^2 - v_3^2)^2 + 4(A_1 A_3)^{-1} a_{31}^2. \quad (44)$$

В силу выражения (44) имеем $D > 0$. Отсюда при заданных условиях и $n_1 < 0, n_3 < 0$ осцилляторы (37) совершают аperiодические движения, отличные от финитных (термин [15]), неограниченно удаляясь от ПР (29).

Итак, малыми движениями ДС (37) в δ^* – окрестности ПР (29) при определенных условиях могут являться как незатухающие периодические осцилляции, так и аperiодические движения, эволюционирующие к движению с неограниченным удалением системы осцилляторов от ее ПР.

5. Устойчивость положения равновесия

Определим достаточное условие устойчивости ПР (29) для ДС (17) в силовом поле с потенциалом (24). Необходимое условие существования этого ПР определяется системой

$$f_1(\alpha) + f_2(\alpha)\cos\beta - f_3(\alpha)\sin\beta = 0, \quad (45)$$

$$f_4(\alpha)\cos\beta - f_5(\alpha)\sin\beta = 0,$$

где обозначено

$$f_1(\alpha) = -a_{11}\sin\alpha + a_{12}\cos\alpha \neq 0,$$

$$f_2(\alpha) = a_{21}\cos\alpha - a_{22}\sin\alpha, \quad f_3(\alpha) = a_{32}\sin\alpha - a_{31}\cos\alpha,$$

$$f_4(\alpha) = a_{23} + \frac{\partial f_3}{\partial \alpha}, \quad f_5(\alpha) = a_{33} - \frac{\partial f_2}{\partial \alpha}.$$

Из системы (45) следует уравнение

$$[f_4(\alpha)]^2 + [f_5(\alpha)]^2 = [f_3(\alpha)f_4(\alpha) - f_2(\alpha)f_5(\alpha)]^2 [f_1(\alpha)]^{-2}, \quad (46)$$

решение которого существует и есть $\alpha = \alpha_*$. Если α_* определено, то, в силу одного из уравнений (45) находится и значение $\beta = \beta_*$. В частности, для $\alpha = 0$ уравнение (46) в силу условий (36) обращается в тождество, а из системы (45) следует $\beta = 0$, что соответствует НПР.

В δ_0 – окрестности НПР $\alpha = \beta = 0$, где α, β принимаются малыми одинакового порядка малости, система (45) имеет решение (35) при условии (34).

Обозначим

$$D_* = (\varphi_* + \chi_*)\varphi_* - (f_2 \sin \beta_* + f_3 \cos \beta_*)^2, \quad (47)$$

$$\varphi_* = f_4 \sin \beta_* + f_5 \cos \beta_*, \quad \chi_* = \Phi_1 - (a_{23} \sin \beta_* + a_{33} \cos \beta_*),$$

$$\Phi_1(\alpha) = -\frac{\partial f_1}{\partial \alpha}, \quad \Delta_* = f_3 f_4 - f_2 f_5 \neq 0.$$

Здесь $f_j = f_j(\alpha_*)$ ($j=2, \dots, 6$), $\Phi_1 = \Phi_1(\alpha_*)$, а $\sin \beta_*, \cos \beta_*$ в силу системы (45) и условия $\Delta_* \neq 0$ определяются равенствами

$$(\sin \beta_*, \cos \beta_*) = \Delta_*^{-1} f_1(f_4, f_5).$$

Пусть $\Pi(\alpha, \beta)$ – потенциальная энергия, соответствующая потенциалу (24), и пусть $\Phi_* = \Pi_{\alpha\alpha}(\alpha_*, \beta_*)$. Тогда для ПР (29)

$$D_* = \Phi_* \Pi_{\beta\beta}(\alpha_*, \beta_*) - [\Pi_{\alpha\beta}(\alpha_*, \beta_*)]^2,$$

откуда и следует соотношение (47). При этом

$$\Phi_* = \Delta_*^{-1} \left(\frac{\partial f_3}{\partial \alpha} f_4 - \frac{\partial f_2}{\partial \alpha} f_5 \right) f_1 + \Phi_1. \quad (48)$$

Итак, устойчивость ПР (29) характеризуется следующими признаками.

Если $D_* > 0, \Phi_* > 0$, где D_*, Φ_* определяются равенствами (47), (48), то, в силу теоремы Лагранжа – Дирихле [16], ПР (29) устойчиво по обобщенным координатам α, β и по обобщенным скоростям $\dot{\alpha}, \dot{\beta}$.

В случае, когда $D_* > 0, \Phi_* < 0$, согласно теореме Ляпунова [17], данное ПР неустойчиво.

При $D_* = 0$ равновесие положения (29) является безразличным (термин [14, с.358]).

Итак, состояние равновесия положения, характеризуемого системой уравнений (45), определяется знаками дискриминантных величин D^* , Φ^* и может быть как устойчивым, так и неустойчивым.

В малой δ_0 – окрестности НПР интеграл энергии (18) может быть представлен в виде

$$\frac{1}{2} \left(A_3 \dot{\alpha}^2 + A_1 \dot{\beta}^2 \right) + \Pi(\alpha, \beta) = h, \quad (49)$$

где потенциальная энергия в силу выражения (31) с точностью до аддитивной постоянной равна

$$\Pi(\alpha, \beta) = \frac{1}{2} (n_1 \alpha^2 + n_3 \beta^2) - a_{31} \alpha \beta - m_1 \alpha - m_3 \beta. \quad (50)$$

При этом область реализуемых малых движений системы осцилляторов (32), аппроксимирующих движение данного твердого тела в потенциальном силовом поле, согласно интегралу (49) определяется условием $h > \Pi(\alpha, \beta)$, $(\alpha, \beta) \in \delta_0$.

Согласно выражению (50), если $\Delta > 0$, $n_1 > 0$, где Δ определяется равенством (34), то в силу теоремы Лагранжа – Дирихле НПР устойчиво по переменным $\alpha, \beta, \dot{\alpha}, \dot{\beta}$.

При $\Delta > 0$, $n_1 < 0$ в соответствии с теоремой Ляпунова о неустойчивости равновесия [17] состояние НПР неустойчиво.

В случае, при котором $\Delta < 0$, НПР данной системы осцилляторов является безразличным (нейтральным)⁶.

6. Стационарное движение

Допуская возможность существования стационарного режима для ДС (4), выделим из множества возможных состояний класс ее стационарных состояний, при которых

$$\dot{\alpha} = \omega_1, \quad \dot{\beta} = \omega_2 \quad (\omega_1^2 + \omega_2^2 \neq 0), \quad (51)$$

где ω_1, ω_2 – постоянные, значения которых определяются в дальнейшем.

Структурная особенность ДС (4) обусловлена тем, что коэффициенты квадратичной формы (2) не зависят от α . Поэтому в дальнейшем рассмотрим режим (51) для силового поля с потенциалом $U = U(\beta)$. Здесь ДС (4) имеет циклический интеграл (9) и для режима (51) интегралы (5), (9) представимы в виде

$$V_1 \equiv \frac{1}{2} [P(\beta)\omega_1^2 + A_{11}\omega_2^2] - Q(\beta)\omega_1\omega_2 - U(\beta) = h,$$

$$V_2 \equiv P(\beta)\omega_1 - Q(\beta)\omega_2 = H.$$

Составим интегральную связку по Четаеву [13] в силу данных интегралов

$$V = V_1(\omega_1, \omega_2, \beta) - \lambda V_2(\omega_1, \omega_2, \beta), \quad (52)$$

где $\lambda \neq 0$ – неопределенный множитель Лагранжа⁷.

Согласно необходимым условиям существования условного экстремума функции $V(\omega_1, \omega_2, \beta)$ (52), имеем

$$r_1 = \frac{\partial V}{\partial \omega_1} \equiv P(\beta)(\omega_1 - \lambda) - Q(\beta)\omega_2 = 0, \quad (53)$$

$$r_2 = \frac{\partial V}{\partial \omega_2} \equiv -Q(\beta)(\omega_1 - \lambda) + A_{11}\omega_2 = 0,$$

$$r_3 = \frac{\partial V}{\partial \beta} \equiv \frac{1}{2} P'(\beta) \omega_1^2 - Q'(\beta) \omega_1 \omega_2 - \lambda [P'(\beta) \omega_1 - Q'(\beta) \omega_2] - U'(\beta) = 0. \quad (54)$$

В равенстве (54), согласно выражениям (3)⁸,

$$P'(\beta) = (A_{22} - A_{33}) \sin 2\beta - 2A_{23} \cos 2\beta, \quad Q'(\beta) = A_{12} \cos \beta - A_{13} \sin \beta.$$

Так как

$$P(\beta) > 0, \quad K(\beta) = A_{11} P(\beta) - Q^2(\beta) > 0 \quad (55)$$

в силу положительной определенности квадратичной формы (2), то система уравнений (53) однозначно разрешима относительно ω_1, ω_2 . Пусть

$$A_{22} \neq A_{33}, \quad A_{23} \neq 0, \quad \operatorname{tg} 2\beta \neq 2A_{23}(A_{22} - A_{33})^{-1}. \quad (56)$$

Тогда $P'(\beta) \neq 0$ и из системы (53), (54) следует⁹

$$\omega_1 = \lambda = \pm \left(-2 [P'(\beta_0)]^{-1} U'(\beta_0) \right)^{1/2}, \quad \omega_2 = 0. \quad (57)$$

Выражение (57) для ω_1 имеет место при

$$P'(\beta_0) U'(\beta_0) < 0. \quad (58)$$

Таким образом, в данном движении позиционная координата β и циклическая скорость ω_1 сохраняют постоянные значения, равные начальным¹⁰.

Уравнения системы (53), (54) можно интерпретировать как множество преобразования Лежандра (ПЛ) (контактного преобразования или инволюции Лежандра [3]) вида $(\omega_1, \omega_2, \beta) \rightarrow (r_1, r_2, r_3)$. Тогда многообразие стационарных вращений в новых переменных задается соотношениями

$$r_i = 0 \quad (i = 1, 2, 3). \quad (59)$$

При этом в исходных переменных многообразие (59) совпадает с ядром данной системы ПЛ¹¹.

Определитель Якоби ПЛ в силу соотношений (53), (54) и второго равенства (57) приводится к виду

$$J(\beta) = -K(\beta) P'(\beta) \left[\frac{U'(\beta)}{P'(\beta)} \right]'. \quad (60)$$

Согласно равенствам (57), (60) для уравнений стационарности

$$J(\beta_0) = \frac{1}{2} K(\beta_0) P'(\beta_0) (\omega_1^2)' = 0,$$

в силу чего группа ПЛ – вырожденная. Это соответствует вырожденному перманентному вращению

$$\omega_1 = \pm \Omega, \quad \omega_2 = 0. \quad (61)$$

Здесь постоянная $\Omega > 0$ определяется начальным значением $\omega_1 = \alpha$ и связана с β_0 первым равенством (57).

Таким образом, стационарным движением твердого тела вида (51) при условиях (56), (58) является вырожденное состояние (61)¹².

Примером силового поля, в котором реализуется движение (61), является поле из класса возможных с потенциалом

$$U(\beta) = -\frac{1}{2} \Omega^2 P(\beta) < 0, \quad (62)$$

представимым в виде

$$U(\beta) = \frac{1}{4} \Omega^2 [(A_{22} - A_{33}) \cos 2\beta + 2A_{23} \sin 2\beta]. \quad (63)$$

При этом должны выполняться первые два ограничения (56) и $\operatorname{ctg} 2\beta \neq -2A_{23}(A_{22} - A_{33})^{-1}$.

На множестве допустимых значений β_0 тригонометрический полином (63) можно трактовать как отрезок ряда Фурье для потенциала с периодом 2π , удовлетворяющий условию (58).

7. Устойчивость стационарного движения

Исследуем устойчивость состояния (61) по Раусу – Ляпунову [19, 20]. Так как переменные $\alpha, \omega_1 = \dot{\alpha}$ – циклические, то, исключая из выражения (2) величину ω_1 в силу циклического интеграла (9), представим аддитивную часть функции Рауса – функцию позиционных координат – в виде

$$R_0(\beta) = -[2P(\beta)]^{-1} H^2 < 0. \quad (64)$$

Здесь $H \neq 0$ в силу соотношений (9), (51), (61).

Для потенциальной энергии W приведенной по Раусу механической системы согласно (64) имеем

$$W(\beta) = \Pi(\beta) - R_0(\beta) = [2P(\beta)]^{-1} H^2 - U(\beta). \quad (65)$$

Тогда необходимое условие существования стационарного движения твердого тела в силу равенства (65) будет

$$-W'(\beta_0) \equiv [2P^2(\beta_0)]^{-1} H^2 P'(\beta_0) + U'(\beta_0) = 0. \quad (66)$$

Это уравнение определяет для функции (65) критическую точку $\beta = \beta_0$.

Коэффициент устойчивости Пуанкаре, знак которого определяет устойчивость состояния (61), равен

$$c^* = W''(\beta_0), \quad (67)$$

где

$$W''(\beta) = [2P^3(\beta)]^{-1} H^2 \{2[P'(\beta)]^2 - P(\beta)P''(\beta)\} - U''(\beta). \quad (68)$$

Выберем силовое поле с потенциалом (62), для которого исключен уровень интеграла (9) $H=0$. В силу соотношений (56), (62), (66) имеем

$$P(\beta_0) = \pm \Omega^{-1} H, \quad (69)$$

где знак выбирается согласно первому условию (55). Применяя равенства (56), (62), (67) – (69), получаем $c^* > 0$, что соответствует локальному минимуму функции $W(\beta)$ в стационарном движении. Кроме того, корни определяющего уравнения (66) для потенциала (62) непрерывно зависят от характерных параметров H, Ω . В силу этого, согласно теореме Рауса – Ляпунова [19], стационарное движение (57), (61) устойчиво на множестве переменных $N = \{\beta, \omega_1, \omega_2\}$.

Поскольку циклический интеграл непрерывен на множестве N равномерно по t , то в силу теоремы об устойчивости [21] устойчивость данного стационарного движения на этом множестве является равномерной.

8. Редукция уравнений движения

Уравнения ДС (4) обладают сильной нелинейностью, что существенно затрудняет получение их точных частных решений. Процедурой, способствующей поиску и получению этих решений, является редукция данной ДС к определяющему уравнению для одной из обобщенных координат α, β .

Поскольку общего алгоритма редуцирования ДС такого типа не существует, рассмотрим некоторые частные случаи, обусловленные особенностями структуры силового поля.

В силу условий (55) ДС (4) приводится к виду

$$K(\beta)\ddot{\sigma} - \Lambda(\beta)F = 0, \quad (70)$$

где

$$\sigma = [\alpha \beta]^T, \quad \Lambda(\beta) = \begin{bmatrix} A_{11} & Q(\beta) \\ Q(\beta) & P(\beta) \end{bmatrix}, \quad F = [F_1 \ F_2]^T,$$

$$F_1(\alpha, \beta, \dot{\alpha}, \dot{\beta}) = U_\alpha - P'(\beta)\dot{\alpha}\dot{\beta} + Q'(\beta)\dot{\beta}^2,$$

$$F_2(\alpha, \beta, \dot{\alpha}) = U_\beta + \frac{1}{2}P'(\beta)\dot{\alpha}^2, \quad \det \Lambda = K(\beta) > 0.$$

Система уравнений (70) редуцируема к определяющему уравнению для координаты β в случае, когда потенциал силового поля с точностью до произвольного ненулевого постоянного множителя имеет вид

$$U(\alpha, \beta) = \alpha [P(\beta)]^{-1}. \quad (71)$$

Действительно, второе уравнение ДС (70) в силу равенств (5), (71) приводится к виду

$$K(\beta)\ddot{\beta} + \frac{1}{2}K'(\beta)\dot{\beta}^2 = \frac{Q(\beta)}{P(\beta)} + hP'(\beta). \quad (72)$$

Уравнение (72) интегрируемо в квадратурах путем сведения его к линейному по $\dot{\beta}^2$ уравнению первого порядка с интегрирующим множителем $K(\beta)$ (55).

Зависимость (71) истолковывается как комбинированный потенциал, построенный путем суперпозиции в виде

$$U(\alpha, \beta) = \alpha [U_0(\beta)]^{-2}.$$

Здесь

$$U_0(\beta) = a_{23} \sin \beta + a_{33} \cos \beta \quad (73)$$

– аддитивная часть потенциала (24), в которой с точностью до общего произвольного ненулевого сомножителя положено $a_{23} = -\sqrt{A_{22}}$, $a_{33} = \sqrt{A_{33}}$, причем $A_{22}A_{33} - A_{23}^2 = 0$, что соответствует известным инерционно-геометрическим свойствам [22]. В этом случае твердое тело – плоская пластина.

Другой случай редуцирования связан с уравнением (13) для потенциала вида $U=U(\beta)$ при условиях (6)¹³.

Пусть силовое поле имеет потенциал вида $U=U(\beta)$, в силу чего ДС (4) обладает интегралом (9). Исключая из второго уравнения этой ДС величину $\dot{\alpha}$ в силу данного интеграла, получаем

$$K(\beta)\ddot{\beta} - \frac{1}{2}Q(\beta)\left[Q'(\beta) + \left(\frac{Q(\beta)}{P(\beta)}\right)'\right]P(\beta)\dot{\beta}^2 = F_0(\beta), \quad (74)$$

где

$$F_0(\beta) = \frac{H^2}{2} \frac{P'(\beta)}{P(\beta)} + P(\beta) U'(\beta).$$

В главных осях тензора инерции редуцированное уравнение (74) упрощается и принимает вид

$$A_1 P(\beta) \ddot{\beta} = F_0(\beta). \quad (75)$$

Уравнения (74), (75) также интегрируемы в квадратурах.

Проведем редуцирование ДС (7), которая в силу соотношений (55) приводится к виду

$$K(\beta)\ddot{\sigma} - \Lambda^*(\beta)F^* = 0, \quad (76)$$

где $\Lambda^* = \Lambda$ при $P(\beta) = A_{33}$,

$$F^* = [F_1 U_\beta]^T, \quad F_1(\alpha, \beta, \dot{\beta}) = U_\alpha + Q'(\beta)\dot{\beta}^2, \quad K(\beta) = A_{11}A_{33} - Q^2(\beta) > 0.$$

Система (76) допускает редуцирование в случае силового поля с потенциалом вида

$$U(\alpha, \beta) = B\alpha + \int \Phi_2(\beta) d\beta, \quad (77)$$

где $B = \text{const} \neq 0$, $\Phi_2(\beta) \in C^0$ – произвольная функция, определенная на множестве допустимых значений потенциала U^{14} .

Действительно, для выражения (77) второе уравнение ДС (76) приводится к виду

$$K(\beta)\ddot{\beta} - Q(\beta)Q'(\beta)\dot{\beta}^2 = A_{33}\Phi_2(\beta) + BQ(\beta),$$

интегрируемому в квадратурах, где

$$\Phi_2(\beta) = a_{23} \cos \beta - a_{33} \sin \beta. \quad (78)$$

Рассмотрим случай редуцирования ДС (17). Исключая из второго уравнения этой системы в силу интеграла (18) величину α , получаем

$$A_1 \ddot{\beta} + \frac{P'(\beta)}{P(\beta)} \left[\frac{1}{2} A_1 \dot{\beta}^2 - U(\alpha, \beta) - h \right] = U_\beta(\alpha, \beta), \quad (79)$$

где $P(\beta)$, $P'(\beta)$ определяются равенствами (19).

Если $U = U(\beta)$, то уравнение (79) является определяющим для β и процедура редуцирования на этом завершается. В более общем случае данное уравнение, приведенное к виду

$$L(\beta) \equiv P(\beta)\ddot{\beta} + \frac{1}{2}P'(\beta)\dot{\beta}^2 = A_1^{-1}\Phi(\alpha, \beta), \quad (80)$$

где

$$\Phi(\alpha, \beta) = \frac{\partial}{\partial \beta} [P(\beta) U(\alpha, \beta)] + hP'(\beta),$$

является определяющим для β в случае, при котором потенциал силового поля представлен в виде

$$U(\alpha, \beta) = [P(\beta)]^{-1} [\Phi_1(\alpha) + \int \Phi_2(\beta) d\beta]. \quad (81)$$

Здесь Φ_1 , Φ_2 – произвольные функции из классов $\Phi_1(\alpha) \in C^1$, $\Phi_2(\beta) \in C^0$.

Редуцированное уравнение относительно β в силу соотношения (80) для силового поля с потенциалом вида (81) будет

$$L(\beta) = A_1^{-1}[\Phi_2(\beta) + hP'(\beta)], \quad (82)$$

где L – дифференциальный оператор, содержащийся в уравнении (80). Уравнение (82) также интегрируемо в квадратурах¹⁵.

9. Бифуркации отслоения инвариантных многообразий стационарных состояний при гироскопическом воздействии

Пусть твердое тело совершает малые движения в δ^* – окрестности ПР (29) при воздействии силового поля с потенциалом (24) и линейного по $\dot{\alpha}, \dot{\beta}$ гироскопического момента. Линеаризуя в этой окрестности уравнения ДС (17) при данных условиях, получим ДС в отклонениях

$$\ddot{p}_1 - k \dot{p}_3 + b_{11}p_1 = 0, \quad \ddot{p}_3 + k \dot{p}_1 + b_{22}p_3 = 0. \quad (83)$$

В уравнениях (83) $(b_{11}, b_{22}) < 0$ – коэффициенты, входящие в ДС (37), в которой $b_{12} = b_{21} = 0$ согласно принятому здесь условию (33); $k = \text{const} \neq 0$ – гироскопический параметр.

Систему уравнений (83) можно рассматривать как линейную ДС (37), стабилизируемую гироскопическими силами [13] в рамках данной задачи, и имеющую ПР

$$\left(p_1, p_3, \dot{p}_1, \dot{p}_3 \right) = 0, \quad (84)$$

которое в силу равенств (30) является образом ПР (29).

Известно [13], что ДС типа (83) обладает независимыми первыми интегралами

$$\begin{aligned} 2F &\equiv \dot{p}_1^2 + \dot{p}_3^2 + b_{11}p_1^2 + b_{22}p_3^2 = h, \\ \Gamma &\equiv k(b_{11}p_1^2 + b_{22}p_3^2) + 2(b_{11}p_1 \dot{p}_3 - b_{22}p_3 \dot{p}_1) + \\ &+ c(p_1^2 - p_3^2 + b_{11}p_1^2 - b_{22}p_3^2) = H, \end{aligned} \quad (85)$$

где h, H – постоянные, $2kc = b_{22} - b_{11}$.

Поскольку порождающим интегралом для ПР (84) может являться каждый из интегралов (85), то данное ПР представляет собой особое стационарное решение ДС (83).

Рассмотрим множество особых инвариантных многообразий (ИМ) (84), соответствующее ДС (83), и введем линейную связку интегралов по Четаеву

$$V\left(p_i, \dot{p}_i \right) = \lambda F - \Gamma \quad (i = 1, 3), \quad (86)$$

где $\lambda \neq 0$ – множитель Лагранжа. Эта связка является максимальным порождающим интегралом (термин [23]) для ИМ (84), параметризованного параметром $-\infty < k < +\infty$ ($k \neq 0$), а также служит порождающей функцией для множества ПР при $-\infty < \lambda < +\infty$ ($\lambda \neq 0$). В силу этого особому множеству ПР (84) можно сопоставить расслоение (в смысле [23]) – плоскость λk . Тогда для каждого фиксированного значения k , соответствующего определенному ПР из данного множества, можно поставить в соответствие слой – ось λ , расположенную в плоскости λk .

Достаточное условие стабилизируемости ПР ДС (83) на ИМ (84) при $n_1 < 0, n_3 < 0$ определяется соотношением

$$\varphi_1(k) \equiv k^2 - n^2 > 0, \quad (87)$$

где

$$n = \mu_1 + \mu_3, \quad \mu_1 = \sqrt{-\frac{n_1}{A_3}}, \quad \mu_3 = \sqrt{-\frac{n_3}{A_1}}$$

– частоты, сопряженные парциальным частотам ν_1, ν_3 ДС (37).

Требую обращения в нуль определителя Якоби для уравнений стационарности на многообразии (86), получим условие существования бифуркаций отслоения (термин [23])

$$\lambda^2 + 2k\lambda - G = 0, \quad (88)$$

где

$$G(k, \mu_1, \mu_3) = k^{-2}(mn)^2 - 2(\mu_1^2 + \mu_3^2), \quad m = \mu_1 - \mu_3.$$

Действительные значения λ , определяемые уравнением (88), существуют при

$$\varphi_1(k)\varphi_2(k) \geq 0, \quad (89)$$

где $\varphi_2(k) = k^2 - m^2$.

Условие (89) выражается через параметры данной задачи в виде

$$k^2 + G(k, \mu_1, \mu_3) \geq 0. \quad (90)$$

Из соотношения (90) следует, что бифуркации отслоения существуют для всех устойчивых стационарных состояний на выделенном многообразии при условии (87).

Из множества допустимых значений параметра k выделим подмножество, удовлетворяющее условию $\varphi_2(k) \leq 0$, из которого следует

$$-m \leq k \leq m. \quad (91)$$

Соотношения (91) характеризуют множество неустойчивых стационарных состояний, для которых также существуют бифуркации отслоения.

Согласно [23], совокупность условий (88), (90) можно трактовать как отслоение от ПР (84) двух двумерных ИМ стационарных движений, определяемых системой

$$\dot{p}_1 - a_2 p_3 = 0, \quad \dot{p}_3 + a_1 p_1 = 0. \quad (92)$$

Здесь

$$a_j = 2b_{jj} [\lambda_p + 2(-1)^j c]^{-1} \quad (j = 1, 2), \quad (93)$$

а λ_p – действительные корни уравнения (88), существующие при условии (90). При этом параметр c интеграла Γ (85) есть $c = (2k)^{-1} mn$.

Система уравнений (92), порождающая систему, идентичную по структуре ДС (39), обладает первым интегралом

$$a_1 p_1^2 + a_2 p_3^2 = h_2,$$

и при $\nu^2 = a_1 a_2 > 0$ характеризует движение свободного гармонического осциллятора, что эквивалентно условию

$$(k \lambda_p)^2 - (mn)^2 > 0.$$

Здесь коэффициенты a_j определяются равенствами (93), $h_2 = \text{const}$. В этом случае ДС (92) является системой двух линейных осцилляторов с одинаковой частотой ν , что имеет место при внутреннем резонансе. В этом же режиме ДС (92) при $a_1 a_2 < 0$, согласно известной закономерности [24], обладает линейным интегралом, существующим на нулевом уровне.

Таким образом, в данной задаче проявляется бифуркационная закономерность [23], состоящая в следующем. Пусть имеет место бифуркация отслоения ИМ стационарных состояний. Тогда суммарная коразмерность отслаивающихся ИМ в фазовом пространстве ДС (83) совпадает с коразмерностью особого стационарного состояния, порождающего данную бифуркацию. При этом:

- от устойчивых стационарных состояний отслаиваются по два устойчивых вырожденных ИМ;
- от неустойчивых стационарных состояний для множества значений параметра k , определяемых неравенствами (91), отслаиваются по два неустойчивых вырожденных ИМ.

10. Комментарий

Следующие разъяснительные примечания отражают некоторые особенности положений данной статьи (см. ссылки в тексте).

1. Конструкционные образцы двухстепенных шарниров и модели движения твердых тел с двумя степенями свободы содержатся в работах [1, 2], а также в обзоре [25]. В этом обзоре (с.108-109) дано краткое описание конструкции двухстепенного подвешенного шарнира для стабилизатора космического аппарата с гравитационной системой ориентации (системой Passive Gravitational Attitude Control System – PGAC).

2. Первый интеграл (9) является интегралом Э. Нетер, порожденным группой симметрий. Он непосредственно следует из одноименной теоремы [3] в силу существующего соответствия всякой однопараметрической группы диффеоморфизмов конфигурационного многообразия ДС (1), сохраняющих функцию Лагранжа, первому интегралу этой системы.

Поскольку скобка Пуассона $[V_1, V_2]=0$, то, согласно [7], интегралы (5), (9) находятся в инволюции. Это позволяет разделить переменные α, β и свести интегрирование ДС (4) к квадратурам.

3. Из соотношений (22), (23) следует, что данная задача изоморфна задаче о плоском движении свободной материальной точки с координатами α, β в силовом поле с потенциалом $U(\alpha, \beta)$ [4,8].

4. Выражение (24) можно интерпретировать как отрезок двойного ряда Фурье периодической функции $U(\alpha, \beta)$ с периодом 2π по α и β , интегрируемой в квадрате для $-\pi \leq (\alpha, \beta) \leq \pi$. Такое аналитическое представление позволяет характеризовать как однородное гравитационное поле, так и его структурные аналоги – однородные стационарные поля с прямолинейными параллельными силовыми линиями: поле неподвижных электрических зарядов и поле сил светового давления (СД-поле).

Стационарное СД-поле здесь представляется как однородное силовое поле, порожденное световым потоком, образованным суперпозицией прямолинейных параллельных световых лучей одинаковой и постоянной интенсивности. Такое СД-поле при определенных условиях является потенциальным [9]. В частности, его потенциал, в соответствии с выражением (24), может быть представлен в виде $U=U(\alpha)$ или $U=U(\beta)$, содержащем лишь линейную зависимость от функций \sin, \cos соответствующих углов.

Таким образом, потенциал вида (24) охватывает определенный класс аналитических представлений для стационарных однородных силовых полей.

Однородное поле силы тяжести представляется потенциалом (24) с коэффициентами [5]

$$a_{ij} = Mg_j r_i \quad (i, j = 1, 2, 3), \quad a_{21} = -Mg_1 r_2, \quad a_{32} = -Mg_2 r_3 .$$

Здесь M, r_i – величина массы и координаты центра тяжести тела в осях Ox_i, g_j – координаты вектора ускорения силы тяжести в осях Ox_j .

Некоторые частные случаи выражения для потенциала (24) таковы. Потенциал U принимает вид $U=U(\alpha)$ или $U=U(\beta)$, если $a_{ij}=0$ ($i=2,3; j=1,2$). При этом, если

$$a_{23} = a_{33} = 0, \quad a_{11}^2 + a_{12}^2 \neq 0,$$

то имеет место первое представление; если

$$a_{11} = a_{12} = 0, \quad a_{23}^2 + a_{33}^2 \neq 0,$$

то второе. Кроме того, возможно представление вида $U(\alpha, \beta) = U_1(\alpha)U_2(\beta)$, если $a_{i1} = a_{j3} = 0$ ($i=1,2; j=2,3$) и для каждой из следующих групп условий в отдельности

$$\begin{aligned} a_{3i} = 0, & \quad a_{21}^2 + a_{22}^2 \neq 0, \\ a_{2i} = 0, & \quad a_{31}^2 + a_{32}^2 \neq 0 \end{aligned} \quad (i = 1, 2).$$

5. Если $\Delta=0$, то характеристическое уравнение (38) имеет нулевой корень, что указывает на возможность существования линейного интеграла ДС (37) [13].

Действительно, если для ДС (37) существует линейный интеграл

$$c_1 p_1 + c_3 p_3 = h_1 \quad (c_1^2 + c_3^2 \neq 0),$$

где $c_1, c_3, h_1 \neq 0$ – постоянные, то в силу уравнений данной ДС имеем $\Delta=0$. Если

$$\Delta = 0, \quad h_1 \neq 0, \quad c_1 \dot{\alpha}(0) + c_3 \dot{\beta}(0) = 0,$$

то из уравнений ДС (37) следует данный первый интеграл.

6. Эти утверждения непосредственно следуют из предыдущего, поскольку для НПР из соотношений (47), (48) при условиях (36) имеем $D^* = \Delta, \Phi^* = n_1$.

7. Интегральную связку (52) можно истолковать как некоторое линейное пространство первых интегралов над собственно евклидовым пространством переменных α, β , выбирая при этом интегралы (5), (9) за базисные.

8. Уравнения состояния (53), (54) совместно с уравнениями ДС (4) определяют возможные стационарные вращения твердого тела в силовом поле с потенциалом $U(\beta)$. Эти вращения можно определить как множество критических точек интеграла энергии V_1 на уровне циклического интеграла V_2 .

9. Известно, что в ДС с циклическими координатами постоянные множители Лагранжа, применяемые в условно экстремальной задаче выделения стационарных движений, интерпретируются как величины, которые с точностью до знака равны циклическим скоростям в стационарных неособых движениях. В данном стационарном движении это проявляется в системе (53), (54), из которой следует $\lambda = \omega_1$. Такая особенность составляет характерное свойство неособых (регулярных) движений, тогда как особые стационарные движения таким свойством не обладают.

10. Другим выражением для ω_1 при $H \neq 0$ в силу интеграла (9) при $\omega_2 = 0$ является

$$\omega_1 = H [P(\beta_0)]^{-1}.$$

Это выражение для движения (61) идентично равенству (69).

11. Известно, что невырожденное ПЛ (преобразование соприкосновения) обратимо и аналитически устойчиво [3]. В силу этого стационарные состояния твердого тела, соответствующие невырожденному ПЛ, устойчивы по отношению к исходным переменным.

12. В случае вырожденного ПЛ, когда определитель Якоби (60) равен нулю, часть величин (59) определяет независимые переменные, полностью характеризующие совокупность состояний твердого тела. Эти состояния принадлежат данной вырожденной части многообразия его стационарных движений.

В силу этого в данных переменных можно исследовать аналитическую устойчивость всего множества вращений тела, содержащихся на этом подмногообразии [18]. Это утверждение исходит из содержания классической теоремы Рауса – Ляпунова об устойчивости [19].

13. Характерно, что дифференциальные операторы, содержащиеся в левых частях уравнений (13), (72), совпадают.

14. Зависимость для потенциала (77) интерпретируется как отрезок тригонометрического полинома (24)

$$U_1(\alpha, \beta) = a_{12} \sin \alpha + U_0(\beta),$$

рассматриваемый для малых значений α , причем $U_0(\beta)$ определяется равенством (73).

15. Если выражение (81) интерпретировать как некоторый комбинированный потенциал, связанный с потенциалом (24), то

$$\Phi_1(\alpha) = a_{11} \cos \alpha + a_{12} \sin \alpha,$$

причем $\Phi_2(\beta)$ определяется равенством (78), а коэффициенты выражения (24), не входящие в Φ_1 , Φ_2 , равны нулю. Следовательно, поле с потенциалом (24) в частном случае коррелирует с силовым полем, комбинированный потенциал которого есть (81).

ЛИТЕРАТУРА

1. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника. М.: Мир, 1989. 622 с.
2. Шахинпур М. Курс робототехники. М.: Мир, 1990. 528 с.
3. Арнольд В.И. Математические методы классической механики. М.: Наука, 1974. 432 с.
4. Уиттекер Е.Т. Аналитическая динамика. М.; Л.: ОНТИ, 1937. 500 с.
5. Болотник Н.Н. Движение абсолютно твердого тела на двухстепенном шарнире в однородном поле тяжести // Прикладная математика и механика. 1995. Т. 59. Вып. 6. С. 908-915.
6. Джакаля Г.Е. Методы теории возмущений для нелинейных систем. М.: Наука, 1979. 320 с.
7. Степанов В.В. Курс дифференциальных уравнений. М.: Физматгиз, 1958. 468 с.
8. Аппель П. Теоретическая механика: В 2 т. Т. 1. М.: Физматгиз, 1960. 516 с.
9. Коган А.Ю., Кирсанова Т.С. Термомеханические явления в движении относительно центра масс космического аппарата с солнечным стабилизатором // Космические исследования. 1992. Т. 30. Вып. 3. С. 312-320.
10. Суслов Г.К. Теоретическая механика. М.; Л.: Гостехиздат, 1946. 655 с.
11. Магнус К. Колебания. М.: Мир, 1982. 304 с.
12. Обморшев А.Н. Введение в теорию колебаний. М.: Наука, 1965. 276 с.
13. Четаев Н.Г. Устойчивость движения. М.: Наука, 1965. 207 с.
14. Голдстейн Г. Классическая механика. М.: Гостехиздат, 1957. 408 с.
15. Голубев Ю.Ф. Основы теоретической механики. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1992. 527 с.
16. Кузьмин П.А. Малые колебания и устойчивость движения. М.: Наука, 1973. 207 с.
17. Ляпунов А.М. Общая задача об устойчивости движения. М.; Л.: Гостехиздат, 1950. 471 с.
18. Иртегов В.Д. Стационарные движения уравновешенного твердого тела и их устойчивость // Тр. Казан. авиац. ин-та. Казань, 1964. Вып. 83. С. 62-70.
19. Ляпунов А.М. О постоянных винтовых движениях твердого тела в жидкости // Собр. соч. Т. 1. М.: Изд-во АН СССР, 1954. С. 276-320.
20. Раус Э.Дж. Динамика системы твердых тел: В 2 т. Т. 1. М.: Наука, 1983. 464 с.
21. Руш Н., Абетс П., Лалуа М. Прямой метод Ляпунова в теории устойчивости. М.: Мир, 1980. 300 с.
22. Виттенбург Й. Динамика систем твердых тел. М.: Мир, 1980. 294 с.
23. Иртегов В.Д. О смене устойчивости при бифуркациях // Проблемы аналитической механики, устойчивости и управления движением. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1991. С. 73-79.

24. Макеев Н.Н. Линейный интеграл и резонанс в сложной механической системе // Проблемы механики и управления. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 1995. С. 113-121.

25. Сарычев В.А. Вопросы ориентации искусственных спутников // Итоги науки и техники. Исследование космического пространства. Т. 11. М.: ВИНТИ, 1978. 223 с.

Макеев Николай Николаевич –

доктор физико-математических наук, профессор,

главный научный сотрудник

Института проблем точной механики и управления РАН

УДК 629.73:514.852

В.Е. Турлапов

**АНАЛИЗ ПОЛОЖЕНИЙ ПЛАТФОРМ СТЮАРТА,
ОСНОВАННЫЙ НА ВАРИАНТЕ СТРУКТУРЫ,
РАЗРЕШИМОМ В РАДИКАЛАХ**

Приведен анализ положений платформы Стюарта, основанный на варианте структуры, разрешенном в радикалах. В данной работе предлагается подход к кинематическому исследованию платформ Стюарта всех типов на основе метода группы нулевого порядка, разработанного автором ранее для одноконтурных групп пространственных рычажных механизмов. Построена эффективная процедура численного решения задачи о положениях платформы Стюарта 6-3 и 6-4, сохраняющая эффективность при большой удаленности рассчитываемого положения от исходного.

V.E. Turlapov

**NUMERICAL DISPLACEMENT ANALYSIS OF STEWART PLATFORMS,
BASED ON A STRUCTURE VARIANT SOLVABLE IN RADICALS**

*A structure variant solvable in radicals, named as zero-power Stewart platform, is a 6-3 Stewart platform, three legs of which are connected in one platform point. An analytical solution based on the Chace formula is constructed. Suggested **algorithm replaces** from 1 up to 3 legs by fictitious legs to convert any Stewart platform into zero-power platform. Geometrical based research of possible zero-power platform displacements is executed, by which one-dimensional Newton method for 6-3 and 6-4 Stewart platforms is constructed. An efficient numerical method for 6-6 and 6-5 platforms is also constructed and investigated.*

Прямая задача кинематики для общего случая платформы Стюарта заключается в определении положения платформы по заданным длинам шести опор и предполагает решение системы 6 нелинейных алгебраических уравнений замкнутости:

$$|t + R \cdot p_i - b_i|^2 = L_i^2, \quad i = 1, \dots, 6, \quad (1)$$

где t – вектор начала системы координат платформы; b_i и p_i – точки базы и платформы в системах координат базы и платформы соответственно; R – матрица ортогонального преобразования из системы координат платформы в систему координат базы; L_i – заданные длины опор, соединяющих точки b_i и p_i . Неизвестными этой системы из 6 нелинейных уравнений являются 3 координаты вектора t и 3 угла поворота, определяющие матрицу R .

Хотя положение платформы можно задать непосредственно, задав вектор t и углы поворота для матрицы R , но решение задачи в форме (1) оказывается весьма важным, так как непосредственное управление положением платформы осуществляется через длины опор. Задача в форме (1) решалась как численно, с целью быстрого получения однозначного решения, так и в замкнутом виде в форме полинома одной переменной, с целью определения максимального числа возможных решений (сборок механизма) и получения этих решений для нужд синтеза. Интересна она и для исследования кинематических возможностей платформы, чувствительности платформы к допускам и анализу отклонений от расчетных положений, вызванных допусками на L_i . На сегодняшний день задача (1) кинематики платформ Стюарта решена принципиально для платформы любой структуры [1]. Однако остается актуальным дальнейшее повышение эффективности ее решения.

В данной работе предлагается подход к кинематическому исследованию платформ Стюарта всех типов на основе метода группы нулевого порядка, разработанного автором ранее для одноконтурных групп пространственных рычажных механизмов [2]. Термин *порядок* отражает число нелинейных алгебраических уравнений замкнутости, применяемых для численного решения задачи о положениях, оставшееся после аналитического разрешения той части уравнений, которая допускает решение в радикалах.

Вариант структуры, разрешимый в радикалах, названный в работе платформой Стюарта нулевого порядка, – это платформа Стюарта 6-3, три опоры которой соединены в одной точке платформы. Этот вариант структуры совпадает со структурой, найденной в работах [3-4], но решение в радикалах задачи о положениях для платформы Стюарта нулевого порядка получено другим путем [5]: на основе декомпозиции платформы на структурные группы ВСС и применения формулы Чейса.

Предлагаемый подход предусматривает реструктуризацию исходной произвольной платформы Стюарта к платформе нулевого порядка введением от 1, для платформ 6-3 и 6-4, до 3, для платформ 6-6, *фиктивных* опор. Длины фиктивных опор являются неизвестными параметрами в уравнениях замкнутости задачи о положениях, а длины опор, не вошедших в платформу нулевого порядка, являются правыми частями уравнений замкнутости.

В итоге, например, для платформы Стюарта 6-3 платформу нулевого порядка получим, убрав опору b_5p_3 и добавив вспомогательную опору b_5p_1 (рис.1). Длину вспомогательной опоры примем за неизвестное x . Платформа нулевого порядка позволяет найти такие положения точек p_1, p_2, p_3 , которые точно соответствуют длинам опор L_1-L_4 и L_6 . А истинная величина x должна обеспечить величину расстояния между точками b_5 и p_3 , равную L_5 . Таким образом, уравнение замкнутости, которое необходимо решить в задаче о положениях платформы, становится нелинейным однопараметрическим уравнением и примет вид:

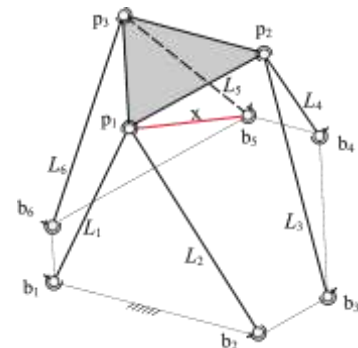


Рис. 1. Платформа Стюарта 6-3 и ее преобразование к платформе нулевого порядка

$$|\mathbf{p}_3(L_1, \dots, L_4, x, L_6) - \mathbf{b}_5|^2 = L_5^2, \quad (2)$$

где \mathbf{p}_3 – точка платформы в системе координат базы [5].

Численное решение. Для целей численного решения удобно переписать уравнение (2) в виде

$$F(x) = |\mathbf{p}_3(L_1, \dots, L_4, x, L_6) - \mathbf{b}_5| - L_5 = 0. \quad (3)$$

Для обеспечения быстрой сходимости построим для решения (3) итерационную процедуру, близкую к методу Ньютона, т.е.

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} - F(x^{(k)}) / F'(x^{(k)}), \quad (k = 0, 1, \dots), \quad (4)$$

где k – номер итерации. Если производная $F'(x^{(k)})$ непосредственно неизвестна, то она может быть получена приближенно в разностной форме, что даст итерационную формулу, соответствующую известному методу секущих.

Наличие корректной оценки $F'(x^{(0)})$ тем важнее, чем больше взаимное удаление вычисляемых положений. Оценка производной построена на исследовании геометрии возможных мгновенных перемещений платформы нулевого порядка при изменении длины x фиктивной опоры.

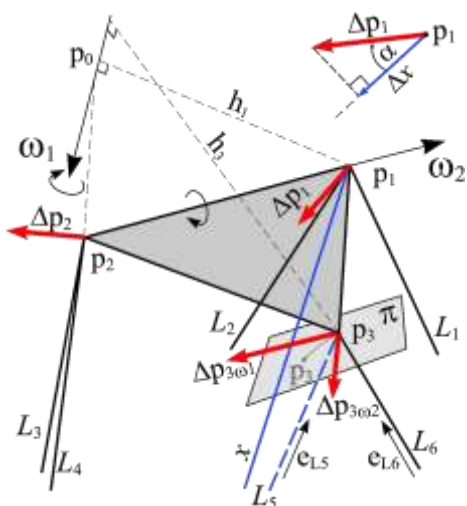


Рис. 2. Возможные движения точек платформы при $\Delta x < 0$

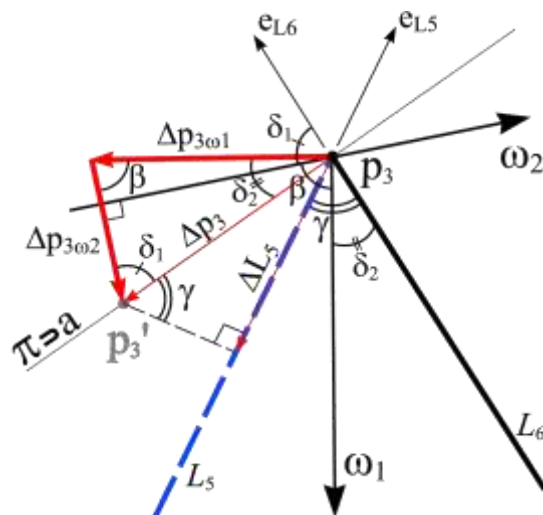


Рис. 3. Геометрическая связь вращений точки \mathbf{p}_3 с изменением длины опоры L_5

В результате получено следующее выражение для производной в решении нелинейного уравнения замкнутости методом Ньютона:

$$F'(x) = \frac{\Delta L_5}{\Delta x} = s_{F'} \cdot \frac{\sin \beta \cdot \sin \gamma}{\cos \alpha \cdot \sin \delta_1} \cdot \frac{h_3}{h_1}, \quad (5)$$

где $s_{F'} = \text{sign}[(\mathbf{e}_{L_6} \times \mathbf{e}_{L_5}) \cdot (\mathbf{e}_{L_6} \times \Delta \mathbf{p}_{3o1})]$ – знак производной. Построена эффективная процедура численного решения задачи о положениях платформы Стюарта 6-3, сохраняющая эффективность при большой удаленности рассчитываемого положения от исходного. Протестирована сходимость процедуры для нескольких случаев удаленности рассчитываемого положения от исходного: поворота платформы вокруг вертикальной оси на 30° ; переноса платформы на расстояния порядка трети и целой длины опоры:

Исходное положение платформы Стюарта 6-3:

| | | | | | | | | | |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | b_1 | b_2 | b_3 | b_4 | b_5 | b_6 | p_1 | p_2 | p_3 |
| x | -67.4 | -17.3 | 17.3 | 67.4 | 50.1 | -50.1 | -34.6 | 34.6 | 0 |
| y | 19.0 | -67.8 | -67.8 | 19.0 | 48.9 | 48.9 | -20.0 | -20.0 | 40 |
| z | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |

Таблица 1

Результаты тестирования при условии выхода: $F(x) < \varepsilon = 1E-04$

| Итерации $F(x^{(k)})$: | Тестовое перемещение платформы изменением L_j | | | |
|----------------------------|---|--|--|---|
| | На 30° вокруг Z (без $F'(x)$) | На 30° вокруг Z (с $F'(x)$) | На $\Delta p_i = (30,0,0)$ (с $F'(x)$) | На $\Delta p_i = (100,0,0)$ (с $F'(x)$) |
| $F(x^{(0)})$ | -3.3E-01 | -3.3E-01 | -28.1 | -42.5 |
| $F(x^{(1)})$ | -4.2E-01 | 4.6E-03 | -2.4E-01 | -3.69 |
| $F(x^{(2)})$ | -4.7E-04 | 5.0E-06 | 5.6E-03 | -8.7E-02 |
| $F(x^{(3)})$ | -6.6E-07 | | -1.9E-06 | 2.5E-04 |
| $F(x^{(4)})$ | | | | -1.8E-08 |

Во всех решенных задачах, при длинах опор порядка 100, перемещениях порядка длины опоры и точности $1.0E-04$, потребовалось от 3 до 5 итераций. Из таблицы видно, что при малых невязках для экономии вычислений в численном решении без потери скорости сходимости может быть применен метод секущих.

Для платформ Стюарта 6-5 и 6-6 показана возможность сведения, за счет построения рекурсивных зависимостей, решения системы соответственно двух и трех нелинейных уравнений к решению одного нелинейного уравнения, уточняемого от итерации к итерации.

Так, для платформы 6-6 система уравнений замкнутости, построенная на основе платформы нулевого порядка, должна включать три нелинейных алгебраических уравнения:

$$|p_i(L_1, x_2, L_3, x_4, x_5, L_6) - b_i| = L_i \tag{6}$$

или $F_i(x_2, x_4, x_5) = 0, \quad i = 5, 2, 4$

где p_i – точки платформы в системе координат базы, полученные обратным преобразованием из локальной системы координат, построенной на трех точках платформы нулевого порядка (p_1, p_3, p_6) . Чтобы построить метод Ньютона для численного решения системы (6), необходимо для каждой $(k+1)$ итерации знать уже 9 частных производных $\partial F_i^{(k)} / \partial x_j^{(k)}, \quad i, j = 5, 2, 4$. Кроме этого, для выбора приращений Δx_j параметров по величине невязок $F_i^{(k)}$ необходимо на каждом шаге решать систему линейных уравнений:

$$\frac{\partial F_i^{(k)}}{\partial x_5^{(k)}} \cdot \Delta x_5 + \frac{\partial F_i^{(k)}}{\partial x_2^{(k)}} \cdot \Delta x_2 + \frac{\partial F_i^{(k)}}{\partial x_4^{(k)}} \cdot \Delta x_4 = F_i^{(k)}, \quad i = 5, 2, 4.$$

Решение системы трех нелинейных уравнений сводится к решению одного нелинейного уравнения, уточняемого от итерации к итерации на основе использования рекурсивной формулы

$$x_j^{(k+1)} = x_j(x_5^{(k)}) = (L_j^2 + L_{j-1,j}^2 - 2L_j L_{j-1,j} \cos \alpha_j^{(k)})^{1/2}, \quad j = 2, 4, \tag{7}$$

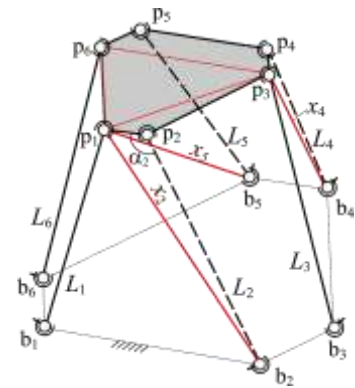


Рис. 4. Платформа Стюарта 6-6 и ее расчетная схема

где $L_{12} = |p_1 p_2|$, $L_{34} = |p_3 p_4|$ – фиксированы.

В результате система (6) трансформируется в одно нелинейное уравнение с одним неизвестным, но уточняемое с каждой итерацией:

$$F_5(x_2(x_5), x_4(x_5), x_5) = |p_i(L_1, x_2(x_5), L_3, x_4(x_5), x_5, L_6) - b_5| - L_5 = 0 \quad (8)$$

Использование при этом вычисления производной $\partial F_5 / \partial x_5$ по формуле (4) позволяет для каждого k -го приближения организовать процедуру как метод Ньютона, но для приближенных значений x_2, x_4 . В результате сходимость процедуры в целом определяется суммой оценок для процесса (4) и процесса (7). Критериями выхода в этом случае могут быть

$$\max\{|\Delta L_5|, |\Delta L_2|, |\Delta L_4|\} \leq \varepsilon, \quad \sum_i |\Delta L_i| \leq \varepsilon, \quad i = \{5, 2, 4\} \text{ и др.}$$

Ниже приводятся результаты тестирования метода для перемещения рассчитываемого положения платформы 6-6 от исходного одновременно по x и по y на величину ($\Delta x = \Delta y = 100$) порядка длины опоры.

Исходное положение платформы Стюарта 6-6:

| | | | | | | | | | | | | |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | b_1 | b_2 | b_3 | b_4 | b_5 | b_6 | p_1 | p_2 | p_3 | p_4 | p_5 | p_6 |
| x | -67.4 | -17.3 | 17.3 | 67.4 | 50.1 | -50.1 | -39.1 | -30.2 | 30.2 | 39.1 | 8.95 | -8.95 |
| y | 19.0 | -67.8 | -67.8 | 19.0 | 48.9 | 48.9 | -13.2 | -28.7 | -28.7 | -13.2 | 39.0 | 39.0 |
| z | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

Таблица 2

Результаты тестирования при условиях выхода: $\max |\Delta L_i|, \sum |\Delta L_i| < \varepsilon = 1E-04$

| Итерации $F(x^{(k)})$: | Перемещение платформы изменением L_i на ($\Delta x = 100, \Delta y = 100$) | | | | | |
|----------------------------|---|--------------|--------------|---------------------|---------------------|----------|
| | ΔL_5 | ΔL_2 | ΔL_4 | $\sum \Delta L_i $ | $\max \Delta L_i $ | x_5 |
| $F(x^{(0)})$ | -25.5 | 1.1 | -17.6 | 44.2 | 25.5 | 147.7 |
| $F(x^{(1)})$ | -9.77 | 0.14 | -2.48 | 12.4 | 9.77 | 121.5 |
| $F(x^{(2)})$ | -2.40 | -0.37 | 0.30 | 3.1 | 2.40 | 110.6 |
| $F(x^{(3)})$ | -0.32 | -0.26 | 0.34 | 0.93 | 0.34 | 107.87 |
| $F(x^{(4)})$ | -6.7E-03 | -0.10 | 0.11 | 0.22 | 0.11 | 107.50 |
| $F(x^{(5)})$ | -9.1E-04 | -2.8E-02 | 1.9E-02 | 4.9E-02 | 2.8E-02 | 107.491 |
| $F(x^{(6)})$ | -5.6E-03 | -6.7E-03 | 9.8E-04 | 1.3E-02 | 6.7E-03 | 107.490 |
| $F(x^{(7)})$ | -3.4E-03 | -1.6E-03 | -3.3E-04 | 5.3E-03 | 3.4E-03 | 107.483 |
| $F(x^{(8)})$ | -1.3E-03 | -4.8E-04 | -1.4E-07 | 1.7E-03 | 1.3E-03 | 107.479 |
| $F(x^{(9)})$ | -3.6E-04 | -1.7E-04 | 6.8E-05 | 6.0E-04 | 3.6E-04 | 107.4777 |
| $F(x^{(10)})$ | -8.8E-05 | -6.3E-05 | 3.6E-05 | 1.9E-04 | 8.8E-05 | 107.4773 |
| $F(x^{(11)})$ | -2.8E-05 | -2.1E-05 | 1.2E-05 | 5.5E-05 | | 107.4772 |

Из табл. 2 видно, что построенный итерационный метод сходится. При точности $1.0E-04$ потребовалось 11-12 (в зависимости от критерия выхода) итераций. Скорость сходимости оказалась высокой, но несколько ниже, чем в чистом методе Ньютона. Из-за использования рекурсии заметно замедлилась, по сравнению с ньютоновской, сходимость в области малых невязок (последние 6 итераций).

Построена классификация решения задачи о положениях для всего ряда 6– N ($N=3,4,5,6$) платформ Стюарта по признаку порядка. Аналогичный подход возможен и к другим механизмам с параллельными приводами.

Предлагаемый подход более эффективен, чем ранее опубликованные, т.к. использует как минимум на одну переменную меньше, чем зарубежные авторы [6-10], и, в отличие от отечественных авторов В.А. Глазунова, А.Ш. Колискова, В.Ф. Чернова [3-4], использует для решения вместо поисковых методов метод Ньютона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dasgupta V., Mruthyunjaya T.S. The Stewart platform manipulator: a review // Mechanism and Machine Theory. 2000. № 35 (1). P. 15-40.
2. Турлапов В.Е. Явные решения задачи о положениях на классе одноконтурных групп пространственных рычажных механизмов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1997. № 3. С. 87-96.
3. Глазунов В.А., Колисков А.Ш., Чернов В.Ф. К решению прямой задачи о положениях L-координатных механизмов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1991. № 2. С. 100-105.
4. Глазунов В.А., Колисков А.Ш., Крайнев А.Ф. Пространственные механизмы параллельной структуры. М.: Наука, 1991. 96 с.
5. Турлапов В.Е. Решение задач кинематики для платформы Стюарта методом группы нулевого порядка // Электронный журнал «Прикладная геометрия». Вып. 4. № 5. МАИ. Март 2002. С. 23-40. <http://www.mai.ru/~apg/>
6. Wang L.C.T., Chen C.C. On the numerical kinematic analysis of general parallel robotic manipulators // IEEE Transactions on Robotics and Automation. 1993. № 9 (3). P. 272-285.
7. Innocenti C., Parenti-Castelli V. Echelon form solution of direct kinematics for general fully-parallel spherical wrist // Mechanism and Machine Theory. 1993. № 28 (4). P. 553-561.
8. Innocenti C., Parenti-Castelli V. Closed-form direct position analysis of a 5-5 parallel mechanism // Trans. ASME. Journal of Mechanical Design. 1993. № 115 (3). P. 515-521.
9. Innocenti C., Parenti-Castelli V. Forward kinematics of the general 6-6 fully parallel mechanism – an exhaustive numerical approach via a mono-dimensional-search algorithm // Journal of Mechanical Design. 1993. № 115 (4). P. 932-937.
10. Ku D.M. Direct displacement analysis of a Stewart platform mechanism // Mechanism and Machine Theory. 1999. № 34. P. 453-465.

Турлапов Вадим Евгеньевич –

доктор технических наук, профессор кафедры «Математическое обеспечение ЭВМ» Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

УДК 539.3

С.М. Шляхов, Э.Ф. Кривулина

ЗАДАЧА ТЕРМОУПРУГОСТИ ДЛЯ КРУГЛОЙ ПЛИТЫ ИЗ ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА В ОДНОМЕРНОМ ПОЛЕ ТЕМПЕРАТУР

Представлено решение задачи термоупругости для круглой плиты, выполненной из пористого материала. В основу решения положен метод конечных элементов (МКЭ). Полученные результаты позволяют оценить НДС плиты при различных законах изменения пористости по толщине и разных способах ее закрепления.

THERMOELASTICITY PROBLEM FOR A THICK ROUND PLATE OF PORISITY MATERIAL IN A ONE-DIMENSIONAL FIELD OF TEMPERATURES

In this article the solution of thermo elasticity problem of a thick round plate (slab) made of porous material is given. The solution is based on finite element methods. The results we've got allow to evaluate strain-stress state of a slab under different laws of variety of porosity along thick and different means of strengthening it.

Рассмотрим тонкую пластину радиуса R , выполненную из пористого материала с пористостью, изменяющейся по толщине h . Пластина может быть как свободной, так и закрепленной по внешнему контуру. Полагаем, что пластинка находится в одномерном поле температур, вызванным внутренним тепловыделением джоулевым теплом.

На верхнем и нижнем торцах пластинки поддерживается постоянная различная температура. Боковые цилиндрические поверхности – теплоизолированы. Теплофизические и механические характеристики материала зависят от местной температуры и пористости (рис. 1). Тепловой режим в пластине – стационарный.

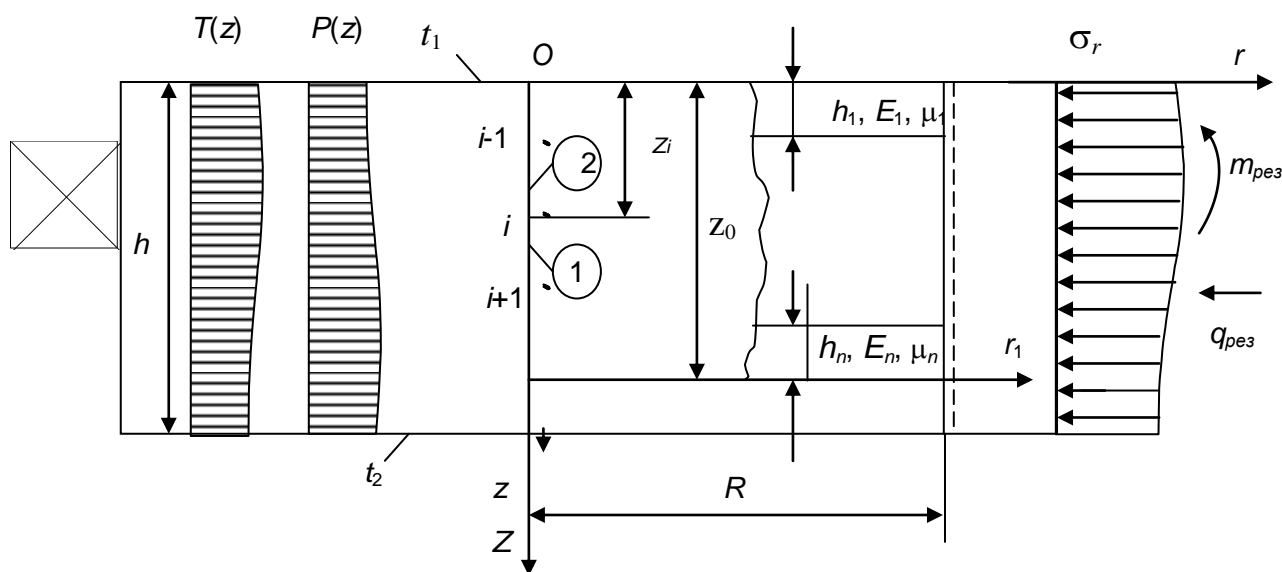


Рис. 1. Схема круглой пластины в одномерном поле температур

Решение задачи теплопроводности сводится к интегрированию нелинейного дифференциального уравнения [1], [2].

$$\frac{d}{dZ} \left[\lambda(T, P) \frac{dT}{dZ} \right] + W(T, P) = 0 \tag{1}$$

при удовлетворении граничным условиям

$$\begin{aligned} T &= t_1 \text{ при } Z = 0, \\ T &= t_2 \text{ при } Z = h. \end{aligned} \tag{2}$$

Здесь $\lambda(T,P)$ – коэффициент теплопроводности материала как функция температуры и пористости; $P(Z)$ – объемная пористость; $W(T,P)$ – удельная объемная мощность источников тепла.

Аппроксимируем $\lambda(T,P)$, $W(T,P)$ функциями

$$\begin{aligned}\lambda(T,P) &= \lambda_0 \sqrt{(1-P)^3} (1 + \beta_1 T + \beta_2 T^2 + \dots), \\ W(T,P) &= W_0 (1-P) (1 + \gamma_1 T + \gamma_2 T^2 + \dots)\end{aligned}\quad (3)$$

в соответствии с [3], [4].

Решение нелинейного уравнения с переменными коэффициентами (1) будем искать по схеме метода последовательных приближений, сведя исходное уравнение к виду

$$\frac{d}{dZ} \left[\lambda^{(m-1)}(Z) \frac{dT(m)}{dZ} \right] + W^{(m-1)}(Z) = 0, \quad m = 1, 2, \dots \quad (4)$$

При $m=1$ принимаем

$$\lambda^{(0)}(Z) = \lambda_0 \sqrt{(1-P)^3}, \quad W^{(0)}(Z) = W_0 (1-P).$$

При $m>1$ имеем

$$\begin{aligned}\lambda^{(m-1)}(Z) &= \lambda_0 [1-P]^{3/2} (1 + \beta_1 T_{(m-1)} + \beta_2 T_{(m-1)}^2 + \dots), \\ W^{(m-1)}(Z) &= W_0 [1-P] (1 + \gamma_1 T_{(m-1)} + \gamma_2 T_{(m-1)}^2 + \dots).\end{aligned}\quad (5)$$

Решение краевой задачи (4)-(2) заменим эквивалентной ей вариационной с поиском минимума соответствующего функционала

$$J_{(m)} = \pi R^2 \int_0^h \left\{ \frac{\lambda^{(m-1)}(Z)}{2} \left[\frac{dT(m)}{dZ} \right]^2 - T_{(m)} W^{(m-1)}(Z) \right\} dZ. \quad (6)$$

Множитель πR^2 перед интегралом в дальнейшем опустим, так как он не влияет на экстремальные свойства функционала.

Для реализации минимума функционала (6) воспользуемся методом конечных элементов (МКЭ) [6].

Разбиваем толщину пластины h на N элементов (отрезков) и пронумеруем их границы $i=1, 2, \dots, N+1$. Обозначим T_i – искомую температуру в i -м узле; соответственно будем иметь $T=t_1$ при $i=1$, $T=t_2$ при $i=N+1$. Рассмотрим два смежных элемента 1 и 2, примыкающих к узлу (i) и представим функционал J в виде суммы

$$J = J_1 + J_2, \quad (7)$$

где имеем

$$\begin{aligned}J_1 &= \int_{Z_i}^{Z_{i+1}} \left\{ \frac{\lambda^{(m-1)}(Z)}{2} \left[\frac{\partial T(m)}{\partial Z} \right]^2 - T_{(m)} W^{(m-1)}(Z) \right\} dZ, \\ J_2 &= \int_{Z_{i-1}}^{Z_i} \left\{ \frac{\lambda^{(m-1)}(Z)}{2} \left[\frac{\partial T(m)}{\partial Z} \right]^2 - T_{(m)} W^{(m-1)}(Z) \right\} dZ.\end{aligned}\quad (8)$$

Другие элементы в сумме (7) можно не учитывать, так как они не содержат узел (i). Представим функцию температур в каждом из элементов линейным сплайном.

$$T_{i,i+1} = N_{11} T_i + N_{12} T_{i+1}; \quad T_{i-1,i} = N_{21} T_{i-1} + N_{22} T_i. \quad (9)$$

Здесь через N_{11}, \dots, N_{22} обозначены функции формы [6]

$$\begin{aligned} N_{11} &= \frac{Z_{i+1} - Z}{Z_{i+1} - Z_i} = \frac{Z_{i+1} - Z}{h_1}, & N_{12} &= \frac{Z - Z_i}{h_1}; \\ N_{21} &= \frac{Z_i - Z}{h_2}, & N_{22} &= \frac{Z - Z_{i-1}}{h_2}. \end{aligned} \quad (10)$$

Соответственно для функционала J_1 будем иметь

$$J_1 = \int_{Z_i}^{Z_{i+1}} \left\{ \frac{1}{2} \lambda_1^{(m-1)} \left[\frac{dT_{(i,i+1)}^{(m)}}{dZ} \right]^2 - [N_{11} T_i^{(m)} + N_{12} T_{i+1}^{(m)}] W_1^{(m-1)} \right\} dZ, \quad (11)$$

где принято

$$\lambda_1^{(m-1)} = \frac{\lambda_i^{(m-1)} + \lambda_{i+1}^{(m-1)}}{2}, \quad W_1^{(m-1)} = \frac{W_i^{(m-1)} + W_{i+1}^{(m-1)}}{2}. \quad (12)$$

Аналогично можно записать функционал J_2 . Подставляя (9), (10) в (11) и выполняя интегрирование, получим:

$$J_1 = \frac{\lambda_1^{(m-1)}}{2h_{1i}} [T_{i+1}^2 - 2T_i T_{i+1} + T_i^2] - \frac{W_1^{(m-1)} h_{1i}}{2} (T_i + T_{i+1}),$$

аналогично

$$J_2 = \frac{\lambda_2^{(m-1)}}{2h_{2i}} [T_i^2 - 2T_i T_{i-1} + T_{i-1}^2] - \frac{W_2^{(m-1)} h_{2i}}{2} (T_{i-1} + T_i). \quad (13)$$

Условием экстремума функционала J будет

$$\frac{\partial J}{\partial T_i} = \frac{\partial J_1}{\partial T_i} + \frac{\partial J_2}{\partial T_i} = 0. \quad (14)$$

На основании (13) и (14) получим алгебраическую систему уравнений относительно узловых температур

$$T_i^{(m)} = \frac{1}{\frac{\lambda_1^{(m-1)}}{h_{1i}} + \frac{\lambda_2^{(m-1)}}{h_{2i}}} \left\{ \frac{\lambda_1^{(m-1)}}{h_{1i}} T_{i+1}^{(m)} + \frac{\lambda_2^{(m-1)}}{h_{2i}} T_{i-1}^{(m)} + \frac{1}{2} [W_1^{(m-1)} h_{1i} + W_2^{(m-1)} h_{2i}] \right\}, \quad (15)$$

$$i = 2, \dots, N.$$

Здесь $h_{1i} = z_{i+1} - z_i$, $h_{2i} = z_i - z_{i-1}$.

Решение системы (15) дает искомое поле температур по высоте сечения h в m -м приближении. Последовательные приближения повторяются до получения заданной точности решения.

В частном случае, при равномерной сетке разбиения $h_{1i} = h_{2i} = h_0$, формула (15) обретает вид

$$T_i^{(m)} = \frac{\lambda_1 T_{i+1}^{(m)} + \lambda_2 T_{i-1}^{(m)}}{\lambda_1 + \lambda_2} + \frac{h_0^2}{4(\lambda_1 + \lambda_2)} [2W_i^{(m-1)} + W_{i+1}^{(m-1)} + W_{i-1}^{(m-1)}]. \quad (16)$$

Для поиска температурных напряжений в пластине исходим из посылки, что толщина пластинки мала, и в ней реализуется плоское напряженное состояние. Для общности решения остановимся вначале на случае свободной (не закрепленной) пластинки. Для решения применим приближенный прием, основанный на принципе освобожденности от связей, и используем суперэлементный подход.

Представим условно, что плита закреплена по наружному краю радиуса R . В этом случае в плите возникнут окружные σ_θ и радиальные σ_r напряжения.

$$\sigma'_r = \sigma'_\theta = -\frac{E(z)}{1-\mu(z)}\alpha(T)T(z) . \quad (17)$$

Здесь $\alpha(T)$ – средний в рабочем диапазоне температур коэффициент линейного расширения материала как функция координаты (z)

$$\alpha(T(z)) = \frac{1}{T-T_n} \int_{T_n}^T \alpha(\tau) d\tau , \quad (18)$$

T_n – начальная температура бруса, принимаемая чаще за ноль; $E(z)$ – переменный по толщине пластины модуль Юнга, зависящий от пористости и температуры.

На основании [4] представим модуль Юнга и коэффициент Пуассона следующими функциональными зависимостями:

$$E(z) = E(T) \cdot E(P) ,$$

где

$$E(T) = E_0(1 - k_1T - k_2T^2), \quad E(P) = 1 - a_1P + a_2P^2 , \quad (19)$$

$$\mu(z) = \mu_0(1 - c_1p + c_2p^2 - c_3p^3) .$$

Напряжения (17), действующие в заделке, дают результирующее радиальное усилие с интенсивностью

$$q_{рез} = \int_0^h \sigma'_r(z) dz \quad (20)$$

и результирующий момент с интенсивностью

$$m_{рез} = \int_{-z_0}^{(h-z_0)} \sigma'_r(z) z dz , \quad (21)$$

где z_0 – расстояние от нейтрального слоя до торца плиты.

Если плита свободна по краю, то, пренебрегая краевым эффектом, напряжения в ней получим, добавив к напряжениям (17) напряжения от нагрузок (20), (21), взятых с обратным знаком, т.е. $q = -q_{рез}$, $m = -m_{рез}$.

Для нахождения этих напряжений по схеме суперэлементов разобьем плиту по ее толщине на n слоев (дисков).

В пределах толщины h_i каждого i -го диска полагаем пористость и физико-механические характеристики материала постоянными, средними по слою.

Очевидно, что силовой фактор q распределится по слоям в соответствии с жесткостными параметрами слоев при соблюдении равновесия и условий совместности деформаций (рис. 2)

$$q = \sum_{i=1}^n q_i , \quad u_1 = u_2 = \dots = u_i = u_0 . \quad (22)$$

Здесь q_i – интенсивность радиального усилия, приходящегося на i -й диск; u_i – радиальное перемещение i -го диска на контуре $r=R$.

По закону Гука радиальное перемещение на внешнем контуре диска определится по формуле

$$u_i = \frac{R}{E_i} [\sigma_{\theta(i)} - \mu_i \sigma_{r(i)}] . \quad (23)$$

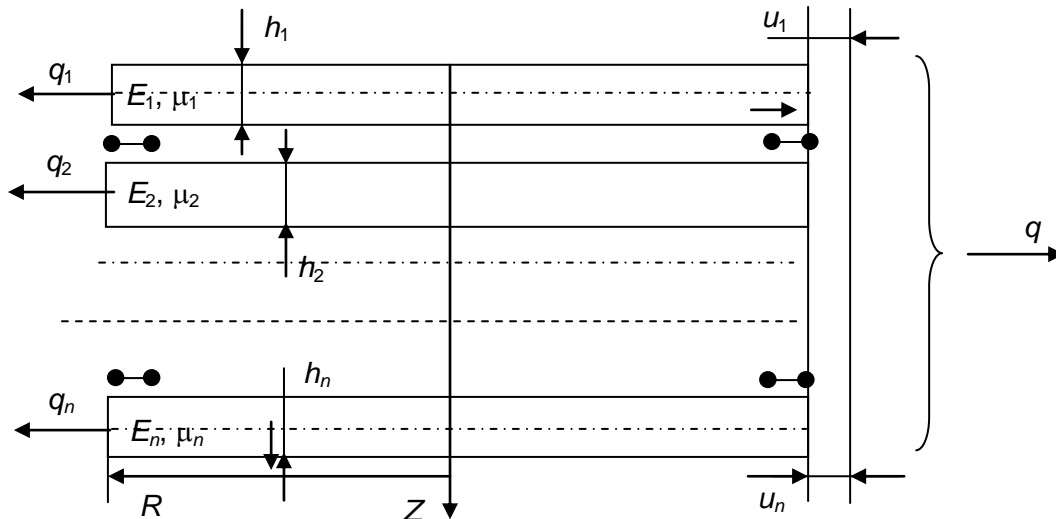


Рис. 2. Распределение силового фактора по слоям

На основании (22) и (23) получим

$$q_i = \frac{q}{\sum_{k=1}^n \frac{(1-\mu_i) h_k E_k}{(1-\mu_i) h_i E_i}}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (24)$$

Соответственно получим значения радиальных и окружных напряжений в i -м диске от нагрузки q_i по формуле

$$\sigma_{r(i)}'' = \sigma_{\theta(i)}'' = \frac{q_i}{h_i}. \quad (25)$$

При оценке напряжений, обусловленных краевым моментом m , воспользуемся гипотезой единой нормали для всех слоев (суперэлементов) плиты (рис. 1).

Следуя [7], расстояние z_0 от нейтральной поверхности плиты до ее основания определится по формуле

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n E_i h_i \left[2 \sum_{k=1}^i h_k - h_i \right]}{2 \sum_{i=1}^n E_i h_i}. \quad (26)$$

Для изгибной жесткости всего пакета слоев в целом принимается значение

$$D = \frac{1}{3(1-\mu_0^2)} \sum_{i=1}^n E_i \left[(z_0 - \sum_{k=0}^{i-1} h_k)^3 - (z_0 - \sum_{k=1}^i h_k)^3 \right]. \quad (27)$$

Здесь μ_0 – приведенный коэффициент Пуассона для всего пакета «слоев»

$$\mu_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i \bar{E}_i h_i}{\sum_{i=1}^n \bar{E}_i h_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (28)$$

где $\bar{E}_i = \frac{E_i}{1-\mu_i^2}$ – эффективный модуль Юнга.

Согласно принятой гипотезе напряжения, возникающие в нормальных сечениях плиты в слоях, расположенных на расстоянии z от нейтральной поверхности, определяются по формуле

$$\sigma_{r(i)}''' = \sigma_{\theta(i)}''' = \frac{E_i z}{1 - \mu_i} \left(\frac{d \vartheta}{dr} + \mu_i \frac{\vartheta}{r} \right), \quad (29)$$

где угол наклона нормали ϑ определится из решения задачи изгиба круглой плиты, нагруженной по контуру моментами m

$$\vartheta = \frac{m r}{D(1 + \mu_0)}. \quad (30)$$

На основании (30) формула для напряжений (29) примет вид

$$\sigma_{r(i)}''' = \sigma_{\theta(i)}''' = \frac{m z E_i}{D(1 - \mu_i^2)} \left[\frac{1 + \mu_i}{1 + \mu_0} \right]. \quad (31)$$

Окончательно для свободной плиты (рис. 3, в) будем иметь $\sigma_{r(i)} = \sigma_{\theta(i)} = \sigma'_{(i)} + \sigma''_{(i)} + \sigma'''_{(i)}$, т.е.

$$\sigma_{r(i)} = \sigma_{\theta(i)} = -\frac{\alpha T E(z)}{1 - \mu(z)} + \frac{q_i}{h_i} + \frac{m E_i z}{D(1 - \mu_i)(1 + \mu_0)}. \quad (32)$$

При наличии подвижной заделки (рис. 3, б), разрешающей радиальное напряжение, но закрепляющей поворот, в формуле (32) убирается последнее слагаемое. В случае жесткой заделки (рис. 3, а) в формуле (32) остается лишь первое слагаемое.

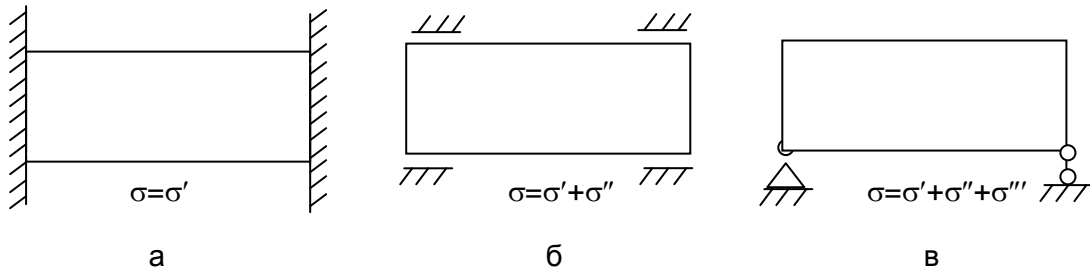


Рис. 3. Различные способы закрепления пластины

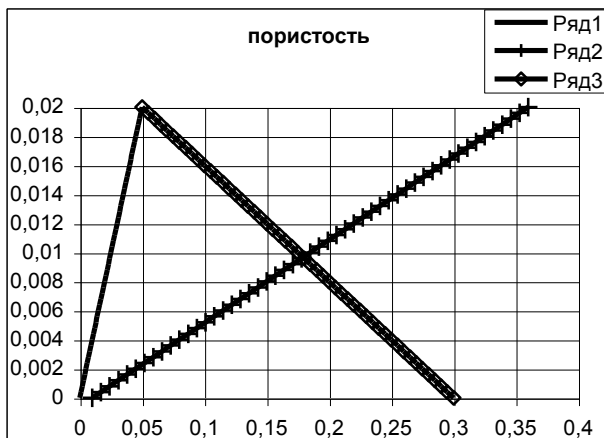
На основании полученных формул проведено исследование полей температур и напряжений круглой пластины, выполненной из пористого железа. Температурное поле вызвано внутренним тепловыделением джоулевым теплом с удельной объемной мощностью источника $W_0 = 60000 \frac{\text{кВт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$. Высота пластины $h = 0,02 \text{ м}$, $h \ll R$.

Пористость изменяется по высоте сечения по линейному закону (рис. 4, а): P_1 от 0% при $z=0$ до 5% при $z=h$ (ряд 1), P_2 от 1% при $z=0$ до 36% при $z=h$ (ряд 2), P_3 от 30% при $z=0$ до 5% при $z=h$ (ряд 3). На верхней и нижней границах плиты поддерживается постоянная температура $t_1 = 100^\circ\text{C}$ и $t_2 = 10^\circ\text{C}$ соответственно (рис. 1).

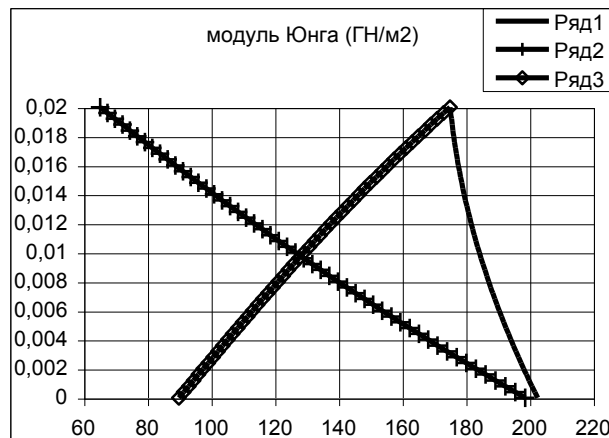
Изменение физических параметров по высоте в зависимости от пористости изображено на рис. 4, б, в.

Влияние пористости на теплофизические характеристики показаны на рис. 5, а, б.

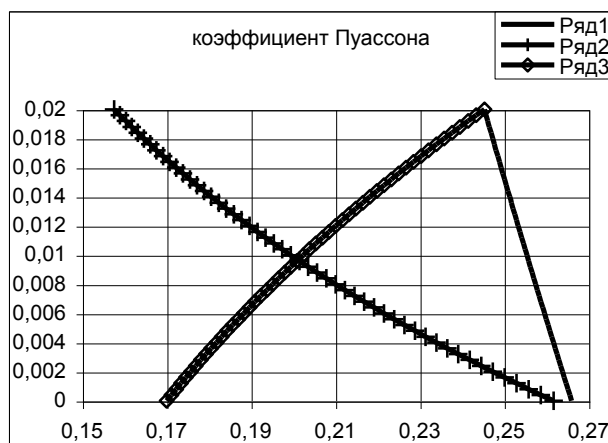
Рис. 6 отражает напряженное состояние при различных закреплениях пластины.



а

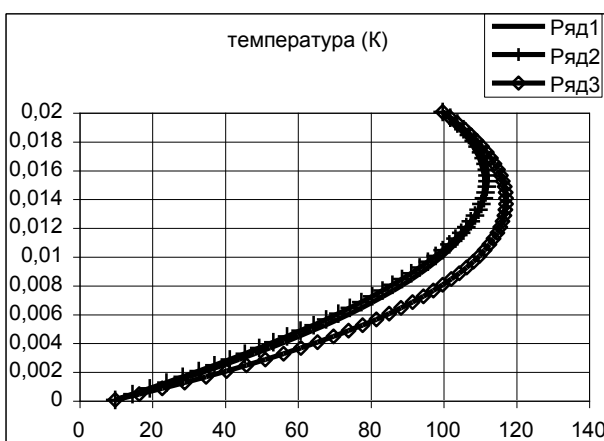


б

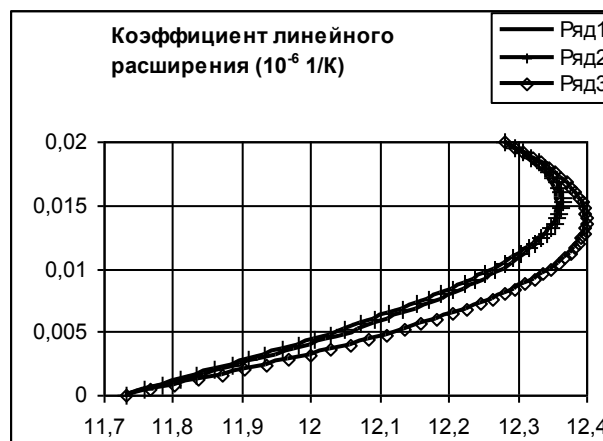


в

Рис. 4. Физические параметры:
а – пористость; б – модуль Юнга (ГН/м²); в – коэффициент Пуассона



а



б

Рис. 5. Тепловые параметры:
а – температура; б – коэффициент линейного расширения ($\cdot 10^{-6}$ 1/К)

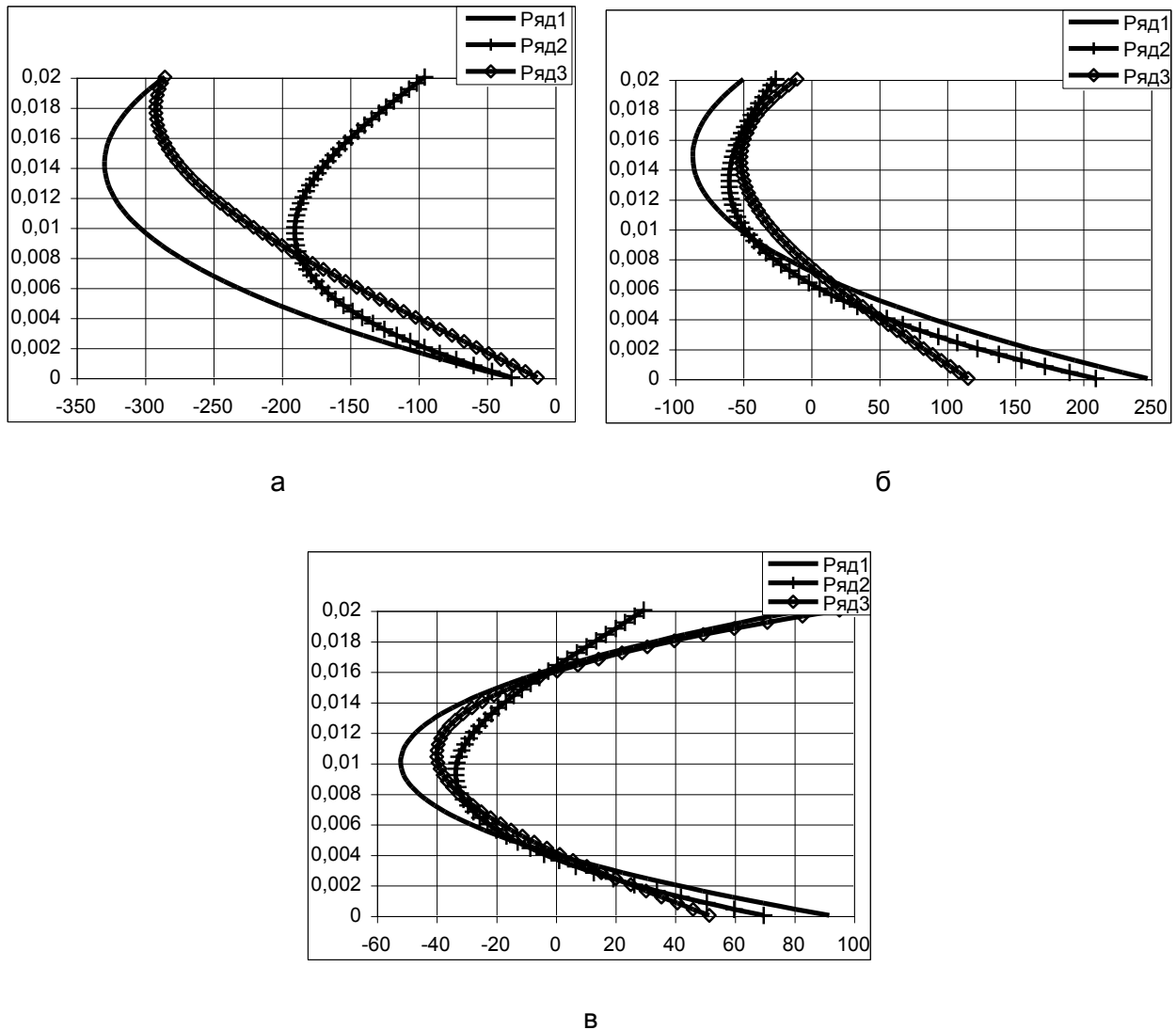


Рис. 6. Напряженное состояние пластины:
а – в случае жесткого закрепления по контуру (МПа);
б – в случае скользящей заделки (МПа);
в – при шарнирно подвижном опирании плиты (МПа)

Как следует из полученных результатов, зависимость характеристик материала от пористости существенно сказывается на НДС пластины и должна учитываться в расчетах плит на прочность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коздоба Л.А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности. М.: Наука, 1975. 228 с.
2. Шнейдер П. Инженерные проблемы теплопроводности. М.: Изд-во ИЛ., 1960. 479 с.
3. Литовский Е.Я., Пучкелевич Н.А. Теплофизические свойства огнеупоров. М.: Металлургия, 1982. 152 с.
4. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов. М.: Физматгиз, 1959. 356 с.

5. Кашталян Ю.А. Характеристики упругости материалов при высоких температурах. Киев: Наукова думка, 1970. 112 с.

6. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979. 392 с.

7. Королев В.И. Упругопластические деформации оболочек. М.: Машиностроение, 1971. 304 с.

Шляхов Станислав Михайлович –

доктор физико-математических наук,

профессор кафедры «Механика деформируемого твердого тела и прикладная информатика»

Саратовского государственного технического университета

Кривулина Эльвира Федоровна –

аспирант кафедры «Механика деформируемого твердого тела и прикладная информатика»

Саратовского государственного технического университета

НАДЕЖНОСТЬ МАШИН

УДК 622.24.051.5 (083)

А.Н. Виноградов, В.Г. Куранов

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БУРОВЫХ ШАРОШЕЧНЫХ ДОЛОТ НА ОСНОВЕ КОМБИНАЦИИ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ

Приводится анализ современных конструкций буровых шарошечных долот, даются рекомендации по повышению их эксплуатационных характеристик на основе новых трибологических принципов и эффектов. Предлагается новая запатентованная конструкция долота, использующего эти эффекты.

A.N. Vinogradov, V.G. Kuranov

CHISEL CONE ROCK BITS OPERATING CHARACTERISTICS INCREASE ON THE BASIS OF A SPEED KEY OF TRIBOLOGICAL EFFECTS

The article analysis modern constructions of chisel cone rock bits and gives recommendations for increasing their operating characteristics on the basis of new of tribological principles and effects. The new licensed construction of a chisel using these effects is offered here.

Буровые шарошечные долота, применяемые в буровой технике для бурения скважин при добыче нефти, газа и воды, несут большие динамические нагрузки от воздействия ударов и вибрации. В условиях повышенных температур и недостаточной смазки это приводит к локальным концентрациям контактных напряжений, разрыву масляной пленки и схватыванию трущихся поверхностей, в результате чего снижается ресурс подшипников и возникает опасность заклинивания опоры. Этому способствуют также перекосы шарошки и возникновение краевого эффекта. Поэтому известные технические решения, с целью повышения ресурса и надежности шарошечных долот, направлены на устранение или снижение отрицательного влияния этих факторов.

Долота типа ГАУ применяют при роторном бурении с частотами вращения 30÷90 мин⁻¹ и осевыми нагрузками 100÷280 кН [1].

Принудительная подача смазки в зоны трения у них осуществляется из маслonaполненных резервуаров с уравнителями давления через систему каналов, соединяющих эти резервуары с полостями опор, имеющих герметизирующие элементы в виде резиновых колец.

Долота типа ГНУ, где герметизация внутренней полости шарошек осуществляется при помощи тарельчатых пружинных герметизирующих уплотнений, применяются при осевых нагрузках $90 \div 310$ кН и частотах вращения $25 \div 90$ мин⁻¹ [1].

При турбинном бурении применяются негерметизированные долота с различными сочетаниями подшипников. Примерный срок службы этих долот отечественного производства, зависящий от режимов бурения, представлен в таблице [2].

| Режимы бурения | Частота вращения долота, об/мин | Стойкость шарошечных долот отечественного производства, ч |
|----------------|---------------------------------|---|
| Турбинное | 600-700 | 8-25 |
| Роторное | 25-250 | 160-200 |

Недостатками всех этих долот являются малый срок службы и, как следствие, большие расходы на их ремонт и замену.

Для повышения надежности и ресурса шарошечных долот ведутся исследовательские работы в нашей стране и за рубежом. Американская компания РИД ТУЛ КОМПАНИ предлагает универсальное долото для турбинного и роторного бурения с опорой скольжения и оригинальным замковым подшипником.

Среди отечественных разработок известна опора скольжения с переменными зазорами в подшипниках, компенсирующими перекося оси шарошки относительно цапфы – патент РФ № 2097522 [3] и снижающими, таким образом, вероятность заклинивания.

Однако для изготовления такой опоры требуется высокоточное специальное оборудование и селективная сборка, что ведет к значительному удорожанию ее изготовления, а в эксплуатации, при наличии переменных по длине зазоров, неизбежны повышения контактных давлений в нормальном режиме (при отсутствии перекося) и интенсивности износа.

Таких недостатков не имеет опора скольжения с клиновидной формой цапфы и сегментными вкладышами, снижающими контактные давления за счет повышения максимального угла – а. с. СССР № 791894 [4].

Однако из-за наличия в ней отверстия для ввода шариков в замковый шарикоподшипник снижаются прочность и надежность шарошечного долота.

Наиболее совершенной, с точки зрения надежности, является опора с подшипниками скольжения в виде плавающих втулок разных размеров, ступенчато перекрывающих друг друга и имеющих нечетное количество спиральных смазочных канавок, снижающих также опасность возникновения вибрации – патент РФ № 2068069 [5], рис. 1.

Но и эта конструкция опоры не лишена недостатков:

- жесткость опорных втулок ограничивает их возможность самоустанавливаться и компенсировать перекося шарошки, в результате чего не достигается снижения контактных давлений на рабочих поверхностях;

- расположение нескольких опорных втулок в разных сечениях создает неопределенность базирования и может вызвать перегрузку отдельных втулок с выходом их из строя;

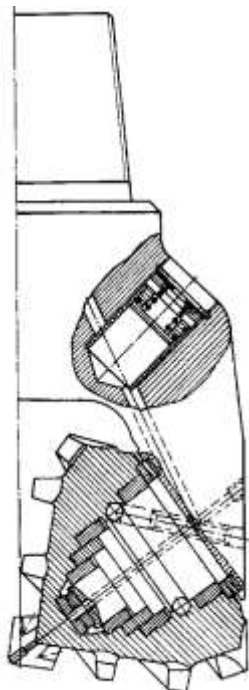


Рис. 1. Опора долота по патенту РФ № 2068069

– наличие большего числа опорных втулок разных размеров и упорных дисков со смазочными канавками, усложняющих и удорожающих конструкцию.

Нами предложена конструкция высоконадежной опоры шарошечного долота, свободная от этих недостатков и основанная на комбинации трибологических эффектов и условий, повышающих их устойчивость:

- эффекта проф. Н.Е. Жуковского о движении без трения [6];
- эффекта избирательного переноса (ИП) проф. Д.Н. Гаркунова [7];
- явления структурной приспособляемости проф. Б.И. Костецкого [8];
- явления фрикционной непроводимости (ФН) проф. В.Г. Куранова, на основе которого сформулированы условия устойчивости ИП [9].

Реализация эффекта «движения без трения», за счет компенсации сил трения принудительным движением промежуточной опоры, осуществляется в нашей конструкции с помощью подвижных пружинных вкладышей, но их движение в отличие от эффекта Н.Е. Жуковского осуществляется без внешнего источника энергии – за счет разности сил трения, возникающих на внутренней и наружной поверхностях вкладыша. Таким образом, устраняется трение покоя. Достижение безыносного трения (ИП) осуществляется с помощью фрикционных покрытий и специальных металлоплакирующих присадок, образующих на поверхности защитные вторичные структуры.

Исследования и применение ИП показали, однако, что он неустойчив в традиционных подшипниках, работающих с зазором в окислительных средах, где он переходит в стационарный режим нормального окислительного трения (НОТ) – наиболее характерного для большинства трибосопряжений.

Профессор Б.И. Костецкий на основе НОТ выдвинул положение об «универсальном явлении структурной приспособляемости», как способности материалов перестраивать структуру поверхностного слоя, чтобы лучше сопротивляться износу.

При исследовании механизмов ИП и ФН автором было установлено, что оба эти явления имеют одну энергетическую природу – активацию поверхности пластической деформацией, которая может реализоваться возникновением как естественной защитной структуры в виде пленки оксида (при НОТ), так и защитных структур другого типа, в том числе характерных для ИП.

Таким образом, в настоящее время имеется достаточно оснований утверждать, что «структурная приспособляемость» действительно является универсальным трибологическим явлением, а ФН и ИП – его частными случаями. Устойчивость ФН ограничивается концентрацией внутреннего (активного) окислителя, истощение которого ведет к схватыванию. На этой основе объясняется причина неустойчивости ИП, который при недостаточности металлоплакирующего материала вытесняется окислительным процессом, и формулируются условия ее повышения:

- 1 – активация поверхности пластической деформацией;
- 2 – ограничение или подавление окислительных процессов.

В традиционных подшипниках эти условия не выполняются.

В нашей конструкции опоры шарошечного долота (патент РФ № 2214497) упругий плавающий вкладыш устанавливается с натягом (условие 1), который регулируется поджатием упругого элемента, а диффузия окислителя ограничивается (условие 2) сальниковым уплотнением.

Опора скольжения шарошечного долота (рис. 2) содержит лапу 1 с цапфой 2, шарошку 3, периферийный и концевой радиальные подшипники скольжения в виде плавающих опорных втулок 4 и 5 (пружинных вкладышей), упорный подшипник скольжения 6 и замковое устройство в виде двух плавающих полуколец 7 и 8 прямоугольного сечения, размещенных в цапфе и шарошке.

Плавающие опорные втулки 4 и 5 имеют в средней части не доходящие до их торцов прорези 9, выполненные по винтовой линии, и напоминают винтовые цилиндрические пружины, навитые из проволоки прямоугольного сечения (рис. 3). Цапфа 2 располагается в запорной втулке 10, образующей с телом шарошки 3 кольцевую канавку для полуколец 7 и 8 замкового устройства. Запорная втулка закрепляется в шарошке резьбовым соединением, затягивающимся при работе бурового долота.

Благодаря плавающим опорным втулкам (пружинным вкладышам) снижается примерно в 2 раза скорость относительного движения рабочих поверхностей, компенсируются перекосы шарошки, повышаются равномерность распределения смазки и износостойкость, а также снижается вероятность возникновения схватывания. Если же схватывание все-таки произойдет, то в результате скручивания пружинных опорных втулок под действием разности моментов трения на наружной и внутренней поверхностях, произойдет освобождение прихваченной детали и подшипник сможет продолжать нормально работать.

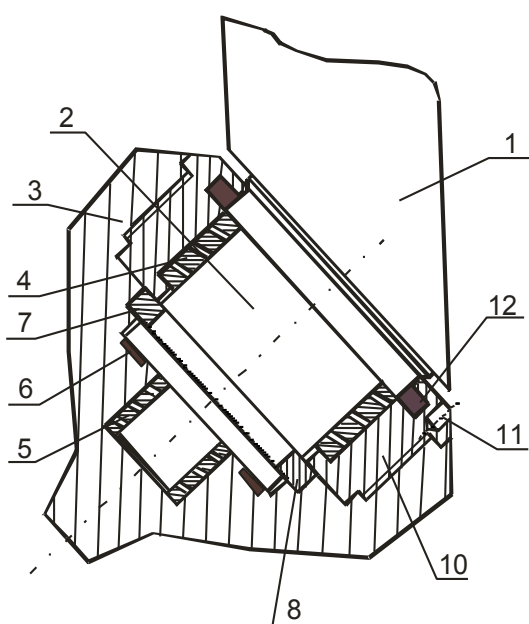


Рис. 2. Разработанная конструкция опоры скольжения долота

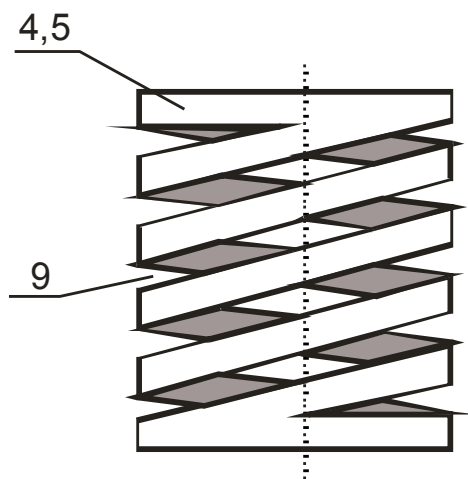


Рис. 3. Плавающая опорная втулка (подшипник скольжения)

Модели конструкции опоры шарошечного долота испытаны в режимах, приближенных к реальным условиям при частотах вращения, характерных для роторного и турбинного способов бурения.

Исследованы различные материалы пар трения, в том числе применяемые в серийных шарошках отечественного производства. Общая конструкция долота не претерпела изменений, которые касались только цапфы лапы долота и внутренних поверхностей шарошек. Исследованы также различные смазки и присадки. Выбраны наиболее эффективные их варианты, исключая схватывание и задиры при значительных осевых и радиальных нагрузках. Для стендовых испытаний использована установка с осевым и радиальным нагружением (рис. 4).

Результаты стендовых испытаний подтвердили высокую надежность предлагаемой конструкции опоры шарошки.

Для отработки и проверки собираемости узла «цапфа лапы долота + шарошка» изготовлены образцы натуральной величины с вырезом $\frac{1}{4}$ части для контроля размеров и состояния рабочих поверхностей после испытаний, рис. 5.

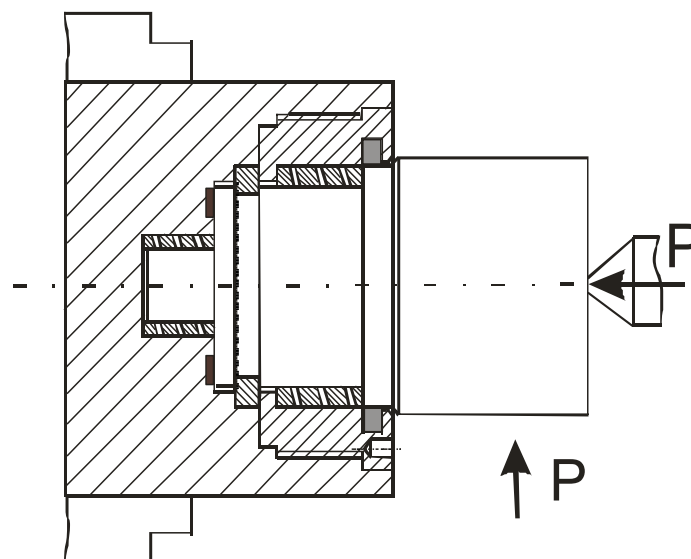


Рис. 4. Схема нагружения модели шарошки

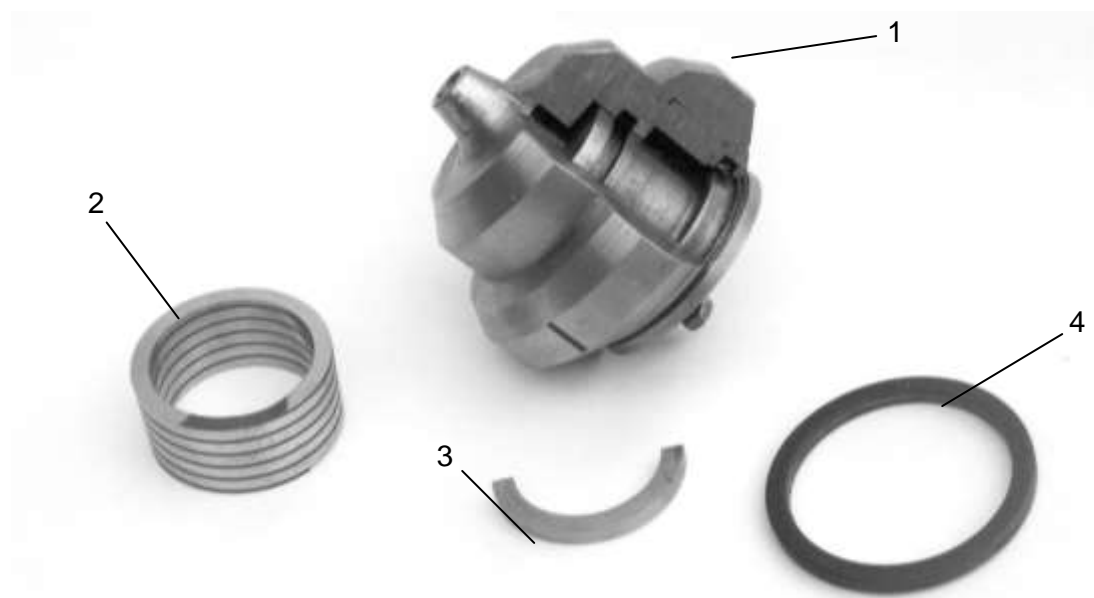


Рис. 5. Детали узла «цапфа лапы долота + шарошка» для проверки на собираемость:
 1 – цапфа с шарошкой в сборе; 2 – пружинный вкладыш; 3 – половинка замкового кольца;
 4 – сальниковое уплотнение

В настоящее время, по соглашению с фирмой ЗАО «ЛУКС», готовится опытная партия долот для проведения испытаний в условиях Западной Сибири и Саратовской области.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 20692-75 «Долота шарошечные. Типы и основные размеры. Технические требования». М.: Изд-во стандартов, 1975. 64 с.
2. Шарошечные долота: Международный транслятор-справочник. М.: АНО «Технонефтегаз», 2000. 250 с.
3. Патент РФ № 2097522. Опора скольжения шарошечного долота / Ю.Г. Матвеев, А.Н. Попов, А.В. Торгашев, С.П. Баталов. Е21В 10/22. Опубл. 27.11.97. Бюл. № 24. 38 с.

4. А.с. СССР № 791894. Опора шарошечного долота / Л.С. Курумов, А.С. Мокшин. Е21В 10/22. Опубл. 30.12.80. Бюл. № 48. 49 с.

5. Патент РФ № 2068069. Опора шарошечного долота / П.Я. Зельцер. Е21В 10/22. Опубл. 20.10.96. Бюл. № 22. 47 с.

6. Справочник Хютте. Т. 1. М.: Главная редакция по машиностроению и металлообработке, 1996. 384 с.

7. Гаркунов Д.Н. Триботехника. М.: Машиностроение, 1985. 424 с.

8. Куранов В.Г., Виноградов А.Н. Избирательный перенос и нормальное окислительное трение – варианты универсального явления структурной приспособляемости// Восстановление и управление качеством деталей машин и механизмов: Межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 1999. С. 27-33.

9. Куранов В.Г. Фрикционная непроводимость слаботочных контактов. Саратов: СГТУ, 1996. 60 с.

Виноградов Александр Николаевич –

кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобили и автомобильное хозяйство» Саратовского государственного технического университета

Куранов Владимир Георгиевич –

доктор технических наук,
профессор кафедры «Автоматизация и управление технологическими процессами» Саратовского государственного технического университета

УДК 629.621.018.66

А.С. Денисов, И.К. Данилов

**ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ СМАЗКИ НА ТОЛЩИНУ МАСЛЯНОГО СЛОЯ
В ШАТУННЫХ ПОДШИПНИКАХ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Рассматриваются вопросы влияния давления в системе смазки модернизированных ДВС КамАЗ-740 Евро на толщину масляного слоя в шатунных подшипниках с использованием гидродинамической теории смазки сопряжения вал-вкладыш и оценивается режим его работы.

A.S. Denisov, I.K. Danilov

**THE INFLUENCE OF OILING CONDITIONS
ON THE DIESEL CRANKSHAFT OIL COATING THICKNESS**

This article describes the hydrodynamic theory of main bearing-backing conjugation oiling and estimated conditions of the new Euro Diesel engine KamAZ-740.

В последнее время специалистами проделана большая работа по повышению надежности двигателей КамАЗ-740. ОАО «КамАЗ – Дизель» освоило выпуск широкой гаммы дви-

гателей автомобилей, тракторов, передвижных и стационарных установок. Вместе с тем, на двигателях КамАЗ-740.11-240 применена комбинированная система смазки, включающая в себя односекционный масляный насос с увеличенной производительностью, совмещенный фильтр с полнопоточными и частично поточными элементами, имеющими тонкость очистки менее 40 мкм и более 5 мкм соответственно и водомасляный теплообменник. Система смазки имеет магистраль и форсунки охлаждения поршней. Это повлекло за собой конструктивные изменения блока цилиндров в части увеличения диаметров масляных каналов, установки форсунок охлаждения и крепления внешних агрегатов. Внесены изменения в конструкцию подвода смазки к подшипникам коленчатого вала, устранены полости грязеуловителей в шатунных шейках. Выходные отверстия масляных каналов теперь полируются, а шатунные и коренные шейки обрабатываются методом скоростного фрезерования и шлифования.

Разработчики новой системы смазки декларируют снижение износов деталей основных трущихся пар в 2-4 раза. То есть, условия смазки, определяющие износы сопряжений, должны быть лучше прежних как минимум в два раза. Для оценки влияния давления в системе смазки на минимальную толщину масляного слоя (ТМС) при изменении вышеперечисленных технологических факторов, воспользуемся гидродинамической теорией смазки.

Поскольку размеры зазоров (капиллярных щелей) в шатунных подшипниках не больше 50 мкм, поток масла носит ламинарный характер [1]. На рис. 1 представлена схема течения масла в шатунном подшипнике в ВМТ. Так как размер внутренней поверхности шатунного подшипника и поверхности шейки коленчатого вала велик по сравнению с ТМС, распределение скоростей в зазоре имеет параболический характер, соответствующий ламинарному течению.

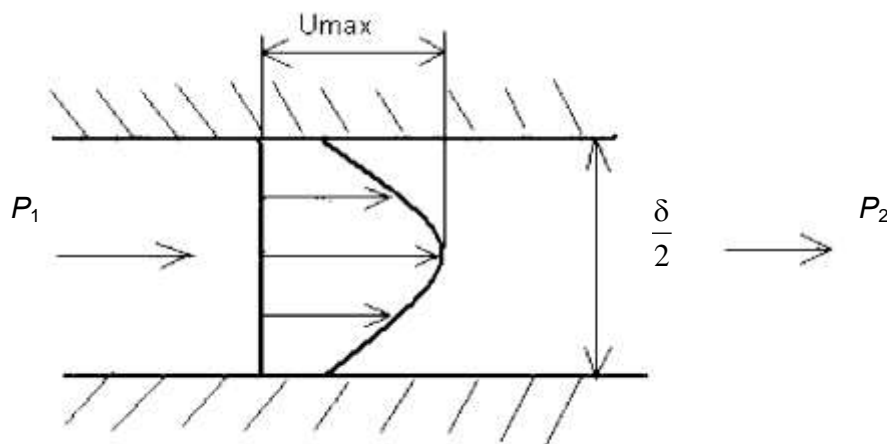


Рис. 1. Схема течения моторного масла под давлением между шатунной шейкой и вкладышем:

U_{\max} – максимальная скорость потока; $\delta/2$ – радиальный зазор;
 P_1 – давление на входе в подшипник; P_2 – давление на выходе из подшипника

Давление масла в системе смазки двигателя при одном и том же количестве масла, подаваемого к шатунным подшипникам масляным насосом [1]:

$$P = \frac{Q^2 \rho}{2 g \mu^2 F}, \quad (1)$$

где F – площадь поперечного сечения зазора между шейкой вала и вкладышами подшипника; ρ – плотность масла; μ – коэффициент расхода масла; g – ускорение силы тяжести; Q – расход масла.

Площадь сечения щели зависит от средней величины зазора δ , радиуса r шейки:

$$F = 2\pi \frac{\delta \cdot r}{2} = \pi \cdot r \cdot \delta, \quad (2)$$

то есть, $F = k \cdot \delta$, где $k = \pi \cdot r$.

С другой стороны, ТМС связана с вязкостной характеристикой масла соотношением [2]:

$$h = \frac{d^2 \cdot \eta \cdot n}{18,36 \cdot P^1 \cdot \delta \cdot c}, \quad (3)$$

где d – диаметр шейки вала; δ – диаметральный зазор; c – поправка Гюмбея; η – вязкость масла; n – частота вращения коленчатого вала; P^1 – нагрузка на площадь проекции подшипника.

Выразив из формул (1) и (3) диаметральный зазор и приравняв правые части, получим:

$$\frac{d^2 \cdot \eta \cdot n}{18,36 \cdot h \cdot P^1 \cdot c} = \frac{Q}{\mu \cdot \pi \cdot r} \sqrt{\frac{\rho}{2P \cdot g}}, \quad (4)$$

откуда после математических преобразований ТМС:

$$\frac{d^2 \cdot \eta \cdot n}{18,36 \cdot h \cdot P^1 \cdot c} = \frac{Q}{\mu \cdot \pi \cdot r} \sqrt{\frac{\rho}{2P \cdot g}}. \quad (5)$$

На рис. 2 схематически показано сопряжение «шатунная шейка – вкладыш» с преувеличенным зазором. Так как в любом радиальном подшипнике существует естественный смазочный клин вследствие особенностей зазора, то при достаточно высоких скоростях в смазке развивается давление, поддерживающее вал и полностью отделяющее его от вкладыша подшипника. Трение в подшипнике в зависимости от параметров и переменных учитывается числом Зоммерфельда в формуле [3]:

$$S_0 = \frac{P^1 \cdot \psi_r^2}{\eta \cdot \omega}, \quad (6)$$

где $P^1 = \frac{F_N}{2r \cdot L}$ – нагрузка, приходящаяся на площадь проекции подшипника;

$\psi_r = \frac{C_r}{r}$ – отношение радиального зазора к радиусу шатунной шейки; η – вязкость масла;

$\omega = \frac{v}{r}$ – угловая скорость. Согласно Фогельполю [4], коэффициент трения можно выразить приближенно в виде:

$$f = \frac{3\psi_r}{c} \text{ при } S_0 < 1, \quad f = \frac{3\psi_r}{c^{\frac{1}{2}}} \text{ при } S_0 > 1, \quad (7)$$

откуда следует, что

$$f \approx \frac{\eta \cdot v \cdot L}{F_N} \text{ при } S_0 < 1 \text{ и } f \approx \left(\frac{\eta \cdot v \cdot L}{F_n} \right)^{\frac{1}{2}} \text{ при } S_0 > 1. \quad (8)$$

Параметр $\frac{\eta \cdot v}{F_N}$ использован в качестве абсциссы кривой Штрибека на рис. 3, показы-

вающим характеристика смазочной системы.

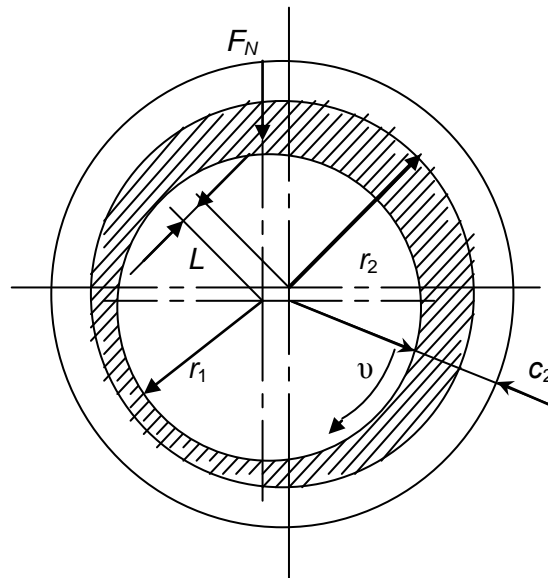


Рис. 2. Схематическое представление геометрии шатунного подшипника:
 F_N – нагрузка; v – скорость; L – эксцентриситет; r_1 – радиус вала; r_2 – радиус втулки;
 $c_2=r_2-r_1$ – радиальный зазор

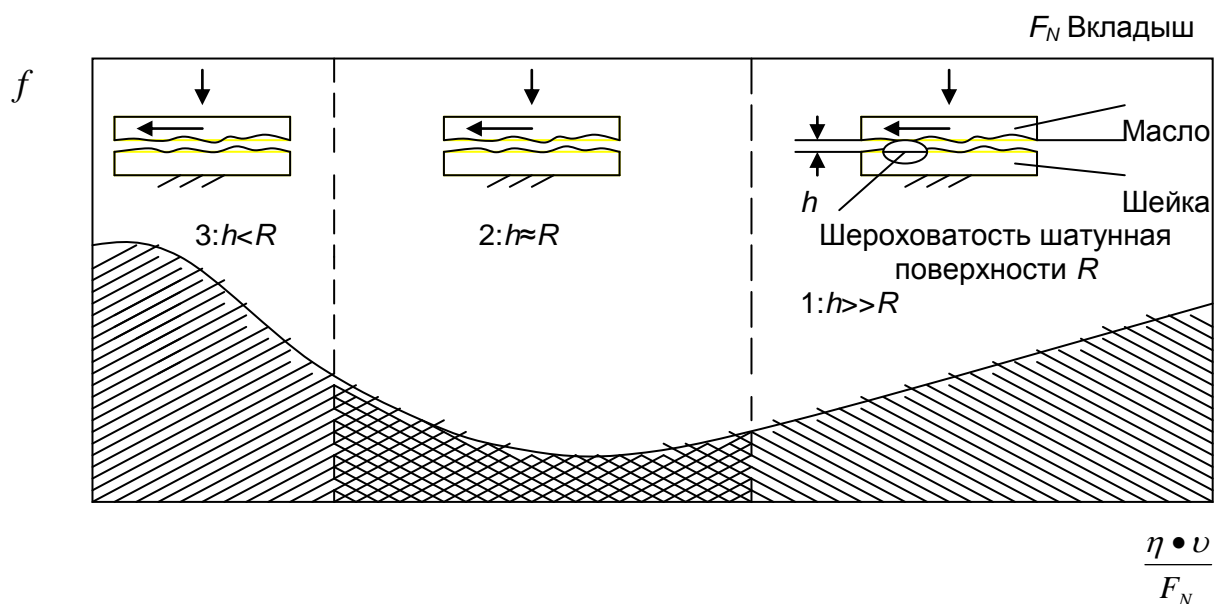


Рис. 3. Кривая Штрибека и режимы смазки шатунных подшипников:
 1 – гидродинамическая смазка; 2 – смешанная смазка; 3 – граничная смазка

В режиме 1 кривой Штрибека поверхности шейки и вкладыша разделены непрерывной смазкой, толщина которой значительно больше шероховатости поверхностей. Сопротивление движению обусловлено внутренним трением смазки. В этом режиме трибологическое поведение определяется методами механики жидкостей. Так как рассматриваемая система состоит из плотно прилегающих контактов, можно не учитывать зависимость вязкости от давления. Этому режиму соответствуют поверхностное усталостное изнашивание, кавитационное изнашивание или жидкостная эрозия. В режиме 2 возможны механизмы изнашивания четырех групп: поверхностное усталостное, абразивное, адгезионное и коррозионно-механическое. Но эти процессы испытывают влияние пленки смазки и видоизменяются под ее действием.

Если условия работы системы в режиме 2 смещаются влево по кривой Штрибека, то число взаимодействий неровностей в пределах площади контакта возрастает, а толщина пленки убывает до нескольких мономолекулярных слоев и менее. В режиме 3 граничной смазки объемные реологические свойства смазки нивелируются, а нагрузка почти полностью воспринимается деформацией неровностей, приводящих к задирам и проворачиванию вкладышей подшипников.

При расчете ТМС по предлагаемой эмпирической зависимости (5) можно говорить о благотворном влиянии увеличения производительности масляного насоса на условия смазки сопряжений коленчатого вала. С другой стороны, с применением турбокомпрессоров на ДВС семейства КамАЗ увеличились значения мощностей и, следовательно, нагрузки на детали цилиндропоршневой группы и кривошипно-шатунного механизма.

Это можно подтвердить, проанализировав выражение (5) относительно влияния на ТМС частоты вращения коленчатого вала, давления в системе смазки, нагрузки в сопряжениях подшипников, заменив коэффициентом K выражение:

$$K = \frac{d^2 \cdot \eta \cdot \mu \cdot \pi \cdot r}{18,36 \cdot c \cdot Q} \cdot \sqrt{\frac{2g}{\rho}} . \quad (9)$$

Тогда ТМС:

$$h = K \cdot \frac{n \cdot \sqrt{P}}{P^1} . \quad (10)$$

При постоянных тепловом, скоростном режимах и нагрузке, приходящейся на площадь проекции подшипника, отношение $\frac{n}{P^1}$ примем за K_1 . Тогда ТМС:

$$h = K \cdot K_1 \cdot \sqrt{P} = 47,4 \sqrt{P} . \quad (11)$$

Общий вид зависимости ТМС от давления в системе смазки характеризуется зависимостью, представленной на рис. 4.

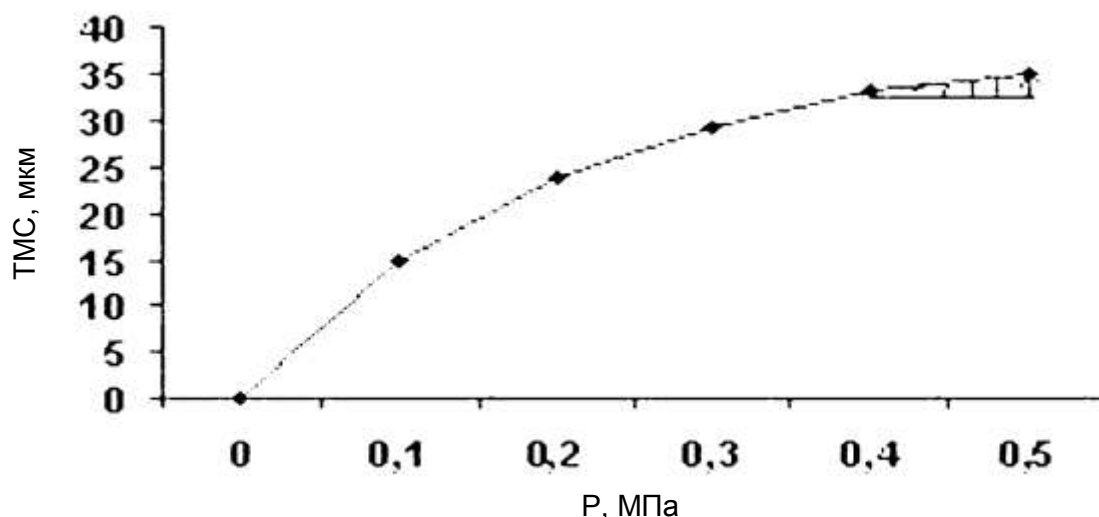


Рис. 4. Зависимость ТМС от давления в системе смазки

Зависимость ТМС от нагрузки, исходя из выражения (5), с учетом (10) при диагностической частоте вращения коленчатого вала [5] и давлении в системе смазки:

$$K_2 = n \cdot \sqrt{P} . \quad (12)$$

Тогда ТМС:

$$h = K \cdot K_2 \cdot \frac{1}{P^1} = 1800 \cdot \frac{1}{P^1} . \quad (13)$$

Характер зависимости ТМС от нагрузки на подшипники с учетом внешней скоростной характеристики ДВС КамАЗ показан на рис. 5.

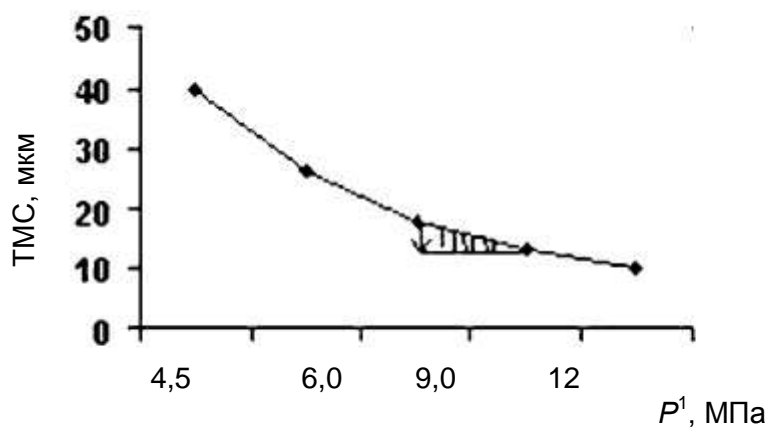


Рис. 5. Зависимость ТМС от нагрузки на сопряжения подшипников

Зависимость ТМС от частоты вращения коленчатого вала, исходя из выражения (10) и приняв за $K_3 = \frac{\sqrt{P}}{P^1}$, будет иметь вид:

$$h = K \cdot K_3 \cdot h = 0,025 h . \quad (14)$$

На рис. 6 представлена зависимость ТМС от частоты вращения коленчатого вала.

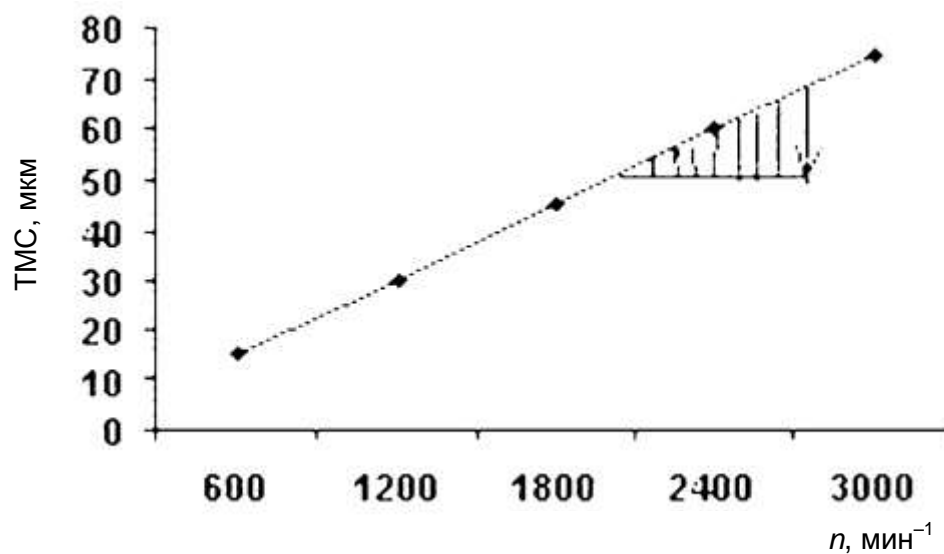


Рис. 6. Зависимость ТМС от частоты вращения коленчатого вала

Исходя из аналитических зависимостей (11), (13), (14), можно констатировать следующее:

1. Повышение давления в системе смазки ДВС КамАЗ-740 Евро с 0,4 до 0,5 МПа повысит ТМС на 4 мкм.
2. Снижение частоты вращения коленчатого вала с 2600 до 2200 оборотов в минуту снизит ТМС на 10 мкм.
3. Увеличение нагрузки на сопряжения подшипников из-за увеличения мощности нового семейства ДВС с 210 до 260 л.с. снизит ТМС на 3 мкм.

Налицо тенденция снижения ТМС форсированных ДВС КамАЗ-740 Евро на 9 мкм, а следовательно, снижение ресурса сопряжения. Причем, при резких изменениях амплитуды частоты вращения коленчатого вала возможен переход в граничный режим смазки.

Таким образом, влияние конструкторских и технологических изменений в ДВС нового семейства улучшили технические характеристики, чего нельзя сказать об их эксплуатационной надежности. Впрочем, это будет очевидным при анализе статистических данных о надежности рассматриваемого сопряжения, которых в настоящее время недостаточно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Башта Т.М. Машиностроительная гидравлика. М.: Машиностроение, 1971. 672 с.
2. Чихос Х. Системный анализ в трибонике. М.: Мир, 1982. 351 с.
3. Расчеты деталей машин: Справочное пособие / Под ред. А.В. Кузьмина. Минск: Вышэйшая школа, 1986. 400 с.
4. Vogelpohl G. Betriebssichere Gleitlager, Springer-Verlag, Berlin, 1978. 73 p.
5. Денисов А.С., Данилов И.К. Исследование режима диагностирования кривошипно-шатунной группы дизельных двигателей по толщине масляного слоя // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2003. № 1. С. 71-75.

Денисов Александр Сергеевич –

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Автомобили и автомобильное хозяйство»
Саратовского государственного технического университета

Данилов Игорь Кеворкович –

кандидат технических наук,
доцент кафедры «Организация перевозок и управление на транспорте»
Саратовского государственного технического университета

УДК 621.91.01

Т.Г. Насад

ИЗНОС ЛЕЗВИЙНОГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ОБРАБОТКЕ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ТЕПЛОВЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

Проведены исследования процесса изнашивания режущего инструмента из твердого сплава при обработке труднообрабатываемых материалов в условиях процесса высокоскоростной обработки с тепловым воздействием

ствием. Модель учитывает влияние температур на свойства обрабатываемого материала и позволяет повысить стойкость режущего инструмента, не снижая производительности обработки.

T.G. Nasad

CUTTING TOOL WEAR AT HIGH-SPEED CUTTING WITH HEAT INFLUENCE

The article demonstrates the researches of the process of being worn out of a cutting tool from hard alloy during procedure of treating of hard materials within the conditions of the process of high speed processing with heat influence. The model takes into consideration the influence of temperature on the characteristics of materials processing and allows increasing firmness of cutting tool.

Повышение эффективности высокоскоростной обработки (ВСО) с дополнительным тепловым воздействием в зоне резания связано с анализом процесса изнашивания режущего инструмента (РИ), так как стойкость относится к определяющим параметрам, влияющим как на производительность, так и на качество обрабатываемой поверхности.

Изнашивание инструмента предопределяет потерю его работоспособности, то есть необходимость замены либо правки. Частая смена РИ влечет за собой потерю производительности обработки и снижает надежность работы оборудования. При работе затупившимся резцом интенсифицируются тепловые процессы, а соответственно и механизмы адгезионного, диффузионного, окислительного и других видов износа.

подавляющее большинство режущих инструментов из твердого сплава не способно работать в условиях высокоскоростного непрерывного резания и частично используется при высокоскоростной прерывистой обработке: строгании, торцевом и концевом фрезеровании. Причина такого использования твердого сплава заключается в его низкой теплостойкости 850-900°C, в то время как ВСО требует от инструмента более высокой теплостойкости при температурах 1000-1300°C.

Столь высокие требования по теплостойкости инструментального материала могут быть снижены, если ВСО осуществлять в условиях предварительного нагрева обрабатываемой поверхности. При нагреве механические свойства материала заготовки снижаются в несколько раз, что приводит к существенному уменьшению сил резания и температурного градиента в детали и инструменте. Для оценки влияния теплового эффекта на изнашивание РИ при ВСО с тепловым воздействием, приняты следующие допущения:

1) Нагрев инструмента производится плоским неподвижным источником теплоты, действующим в течение времени τ_p лезвийного резания [2]:

$$\Theta(x, 0, z) = \frac{q}{2\pi\lambda_0} \int_0^l dx_u \int_{-b}^b \frac{dz_u}{\sqrt{(x-x_u)^2 + (z-z_u)^2}}, \quad (1)$$

где q – интенсивность тепловыделения; x, z – координаты исследуемой точки; x_u, z_u – координаты действующего источника; λ – коэффициент теплопроводности; b – ширина источника; l – длина источника.

2) Общая мощность тепловыделения при ВСО определится выражением [3]:

$$W = P_z V, \quad (2)$$

где P_z – главная составляющая силы резания при ВСО, Н; V – скорость резания, м/с.

3) В процессе контакта резца с заготовкой часть теплоты (итоговый теплопоток) поступает в режущий инструмент, как в наименее нагретое тело.

Нагрев заготовки до заданной температуры Θ_n вызывает снижение механических свойств обрабатываемого материала и облегчает процесс резания. Зависимость механических свойств материалов от температуры нагрева приведена в справочной литературе и может быть аппроксимирована выражением:

$$\sigma_{\epsilon i} = \sigma_{\epsilon 0} \exp\left(-\frac{(\Theta_i - \bar{\Theta}_0)^2}{\kappa \Delta \Theta^p}\right), \quad (3)$$

где $\sigma_{\epsilon 0}$ – предел прочности на разрыв при температуре окружающей среды (20°C); $\sigma_{\epsilon i}$ – предел прочности материала на растяжение при заданной температуре; Θ_i – температура нагрева заготовки; $\bar{\Theta}_0$ – средняя температура окружающей среды; κ – коэффициент, учитывающий степень изменения механических свойств материала в зависимости от температуры нагрева; p – показатель степени.

Расчеты по формуле (3) показывают, что нагрев заготовки из стали 40X до 500°C вызывает снижение ее прочности при резании в 2-2,5 раза.

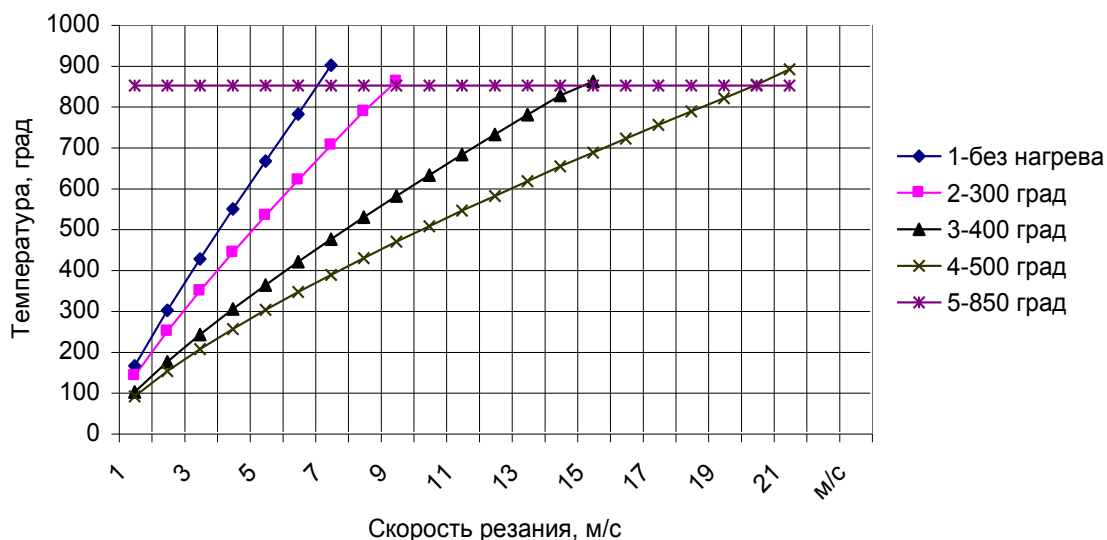
Выполненные ранее исследования [1] позволили установить зависимость силы при ВСО от температуры предварительного нагрева:

$$P_z = CV^{-\alpha} S^\beta a^\gamma B \cdot \Theta_n^e, \quad (4)$$

где Θ_n – температура предварительного нагрева металла до начала ВСО.

Расчеты показывают, что обработка нагретого металла обеспечивает значительное снижение тепловыделения при ВСО и меньшую температуру нагрева режущего инструмента в сравнении с резанием «холодного» металла.

Графики изменения температуры нагрева режущего инструмента от скорости резания с учетом теплового воздействия показаны на рисунке. Анализ полученной зависимости показал, что суммарная температура от фрикционного и лезвийного резания со скоростью 20-25 м/с оказывается примерно такой же, как и при резании холодного металла со скоростями 120-150 м/мин.



Зависимость температуры лезвийного резания при обработке холодного и нагретого металла

Условия реализации схемы ВСО прерывистого резания, при которых обеспечивается необходимая теплостойкость твердого сплава, зависят от следующих факторов:

– времени контакта с заготовкой и структуры цикла нагрев-охлаждение;
– механических и теплофизических характеристик обрабатываемого и инструментального материалов.

При повышении скорости резания возрастает и тепловая напряженность процесса.

Экспериментально установлена связь температуры нагрева поверхности заготовки с режимами высокоскоростного резания:

$$\Theta = CV^{-\alpha} S^{\beta} a^{\gamma} B, \quad (5)$$

где C – эмпирический коэффициент; V , S , a – режимы резания; B – ширина заготовки; α , β , γ – показатели степени (≤ 1). На основании вышесказанного следует ожидать замедления роста температуры с возрастанием скорости резания V .

Структура цикла нагрев-охлаждение является важнейшим условием реализации схемы ВСО с предварительным нагревом. Длительность цикла зависит от ширины обрабатываемой заготовки и скорости резания. Если интенсивность стока за период охлаждения постоянна, то закон охлаждения резца выражается зависимостью:

$$\Theta_{охл} = \Theta_n \exp\left(-4 \frac{\omega_p}{l_1^2} \Delta\tau\right), \quad (6)$$

где Θ_n – температура предварительного нагрева, °C; $\Delta\tau$ – период охлаждения.

Следовательно, подбирая соотношения периода обработки и холостого пробега, учитывая физико-механические свойства контактирующей пары РИ – деталь и используя теплофизические исследования, можно подобрать такие режимы резания, которые обеспечивают оптимальное тепловое воздействие и соответственно минимизируют износ РИ.

Экспериментальные исследования проводились для определения численного значения периода стойкости лезвийного режущего инструмента в зависимости от температурных условий. Увеличение температуры в зоне деформации влечет за собой активизацию адгезионных, диффузионных, окислительных и других процессов, поэтому важно обеспечить условия, при которых стойкость РИ имеет максимальное значение.

В качестве критерия при исследовании принята величина линейного износа резца по задней грани.

Эксперименты проводились при следующих режимах обработки: $V=5...30$ м/с; $S_m=30...120$ мм/мин; $a=1,0...0,3$ мм; $a_1=0,2...1,0$ мм. Исследовались образцы из следующих материалов: сталь 45, сталь X18H9T, сталь 40X, сталь У8А, чугун СЧ-15.

В качестве входных параметров принимались температура предварительного нагрева Θ_n и величина износа по задней поверхности Δu . Эксперименты проводились с использованием двухуровневого дробного факторного эксперимента ДФЭ 2^{5-2} . Обработка экспериментальных данных производилась по известной методике [3], что позволило получить формулу вида:

$$\Delta u = 0,5V^{-0,6} S^{0,2} a_1^{0,6} L^{0,1}. \quad (7)$$

Значения коэффициентов и показателей степени в формуле (7) для различных обрабатываемых материалов представлены в таблице.

Значения коэффициентов и показателей степени в формуле (7)

| Материал заготовки | C_2 | α_2 | β_2 | γ_2 |
|--------------------|-------|------------|-----------|------------|
| Сталь 40X | 0,52 | 0,57 | 0,63 | 0,11 |
| Сталь У8А | 0,55 | 0,54 | 0,61 | 0,12 |
| Сталь X18H9T | 0,54 | 0,52 | 0,59 | 0,11 |
| СЧ-15 | 0,46 | 0,50 | 0,58 | 0,09 |

Используя зависимость (7), можно рассчитать значения режимов ВСО с фрикционным нагревом, обеспечивающих допустимую величину износа и соответственно требуемую шероховатость поверхности R_z . С учетом температуры предварительного нагрева зависимость (7) может быть приведена к виду:

$$\Delta u = \Theta_n^{0,3} V^{0,27} S^{0,12} a_1^{0,6} L^{0,1} . \quad (8)$$

Температура предварительного нагрева определялась режимами фрикционного резания. Из графика видно, что увеличение температуры нагрева с 250 до 400°C для стали 45 вызывает снижение износа резца в среднем в 2 раза. Подобное явление будет иметь место в зоне деформации в течение периода, пока температура не достигнет оптимальных значений, после чего износ снова будет нарастать вследствие активизации диффузионных процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Насад Т.Г. Определение силовых зависимостей при высокоскоростной обработке с дополнительным тепловым воздействием // СТИН. 2001. № 6. С. 26-28.
2. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. М.: Машиностроение, 1981. 279 с.
3. Резников А.Н., Резников Л.А. Тепловые процессы в технологических системах. М.: Машиностроение, 1990. 288 с.
4. Грачев Ю.П. Математические методы планирования эксперимента. М.: Машиностроение, 1970. 278 с.

Насад Татьяна Геннадиевна –

кандидат технических наук, доцент,
докторант кафедры «Автоматизация и управление технологическими процессами»
Саратовского государственного технического университета

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 541.138:541.452:621.357.2

С.Л. Забудьков, А.В. Яковлев, А.И. Финаенов

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ НА СТАЛИ И ТИТАНЕ В 13,5 М HNO₃

Исследовано электрохимическое поведение титана и стали в 13,5 М азотной кислоте. Показано, что в отличие от стали на титане возможно создание электропроводных оксидных слоев, пропускающих катодные токи и предотвращающих химическое воздействие азотной кислоты. Показано, что основным катодным процессом является восстановление азотной кислоты, сопровождающееся выделением молекулярного водорода при потенциалах ниже -0,2 В.

S.L. Zabud'kov, A.V. Yakovlev, A.I. Finaenov

INVESTIGATION OF ELECTRODE PROCESSES ON STEEL AND TITANIUM IN 13,5 M HNO₃

Electrochemical behavior of titanium and steel electrodes immersed into 13,5 M solution of nitric acid is investigated. The difference between behavior of titanium and that of steel was obtained. For titanium electrode, it is possible to form electro conductive oxide film on its surface, which is passive to chemical action of HNO₃ that provides its application as cathode material. It is shown that the main cathodic process is reduction of nitric acid taking place together with hydrogen reduction while electrochemical potential amounts are lower than -0.2 V.

Концентрированные азотно-кислые электролиты находят практическое применение в качестве активного реагента химических источников тока [1-3]; для электрохимического синтеза ряда соединений [4] и, в частности, для получения соединений внедрения графита (СВГ) анодным окислением углеродного материала [5-7]. Проектирование оборудования, эксплуатирующегося в азотной кислоте, сопряжено с необходимостью выбора электродных и конструкционных материалов. Изучению электрохимического поведения различных металлов в азотной кислоте и изучению механизма ее восстановления посвящены многочисленные работы [8-14], однако системные исследования этих процессов в концентрированных растворах HNO₃ практически отсутствуют. В настоящей работе представлены потенциометрические и хроновольтамперометрические измерения на платиновом, титановом и стальном электродах в 13,5М HNO₃, с целью оценки возможности использования их в качестве электродных материалов для реактора электрохимического синтеза СВГ с азотной кислотой.

Методика эксперимента

Эксперименты выполнялись с помощью потенциостата П5848 с регистрацией потенциала или тока во времени самопишущим потенциометром КСП-4, с точностью до 1 мВ и 0,01 мА соответственно. В качестве исследуемых электродов использовались платина (99,9%); нержавеющая сталь (12Х18Н10Т) и титан (ВТ1). Электроды перед проведением эксперимента тщательно обезжиривались безводным ацетоном и промывались в дистиллированной воде. Рабочая поверхность всех электродов составляла 1 см². Серия титановых электродов подвергалась предварительной температурной обработке при $t=700^{\circ}\text{C}$. В качестве электрода сравнения применялся хлорсеребряный электрод (ХСЭ) марки ЭВЛ-1М1. Далее все потенциалы приведены относительно ХСЭ. Электролитом служил 13,5М раствор HNO_3 марки ХЧ (ТУ701-89Е).

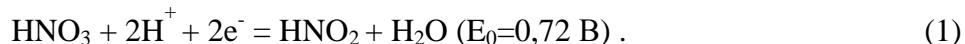
Экспериментальные данные и их обсуждение

Значения стационарных потенциалов (E_{cm}) и время их установления (τ_{cm}) представлены в таблице. Наименьшее τ_{cm} и более высокая воспроизводимость E_{cm} наблюдаются для относительно коррозионно-устойчивого в растворах азотной кислоты платинового электрода. На других материалах время установления равновесия значительно выше.

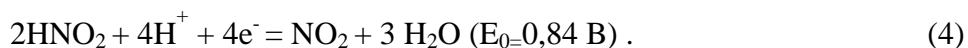
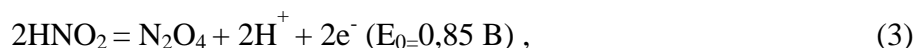
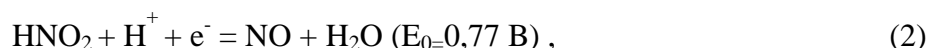
Значения стационарных потенциалов в 13,5М растворе HNO_3
для различных электродов ($t=20^{\circ}\text{C}$)

| Материал электрода | Платина 99,9% | Сталь 02Х08Н10Т | Титан ВТ-1 | Титан (термообр.) |
|--------------------|---------------|-----------------|------------|-------------------|
| E_{cm} , В | 0,92÷0,99 | 0,79÷0,84 | 0,70÷0,90 | 0,80÷0,90 |
| τ_{cm} , МИН | 3÷5 | 6÷10 | 15÷20 | 15÷20 |

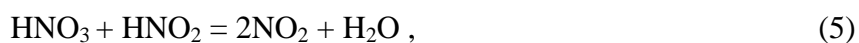
Это связано, по всей видимости, с тем, что на стали и титане происходит взаимодействие поверхностных оксидов металла с молекулами HNO_3 , причем, судя по смещению потенциалов в положительную сторону, степень пассивации поверхности электрода возрастает. Также возрастает и разброс значений $E_{ст}$ в параллельных экспериментах, и особенно он велик для титанового электрода, значение стационарного потенциала которого определяется способом подготовки поверхности электродов. Экспериментально выявлена тенденция, показывающая, что все операции, связанные с предварительным удалением оксидной пленки (механическая зачистка, химическое травление), хотя и незначительно, смещают стационарный потенциал в область отрицательных значений. Напротив, термообработка, т.е. наращивание и уплотнение оксидного слоя приводит к росту потенциала титана в исследуемом растворе HNO_3 . Оценивая полученные результаты по величине $E_{ст}$, можно предполагать, что на платине, с высокой вероятностью, реализуется потенциал восстановления HNO_3 [15]:



Помимо реакции (1) следует учитывать возможность протекания процессов связанных с восстановлением азотистой кислоты и смещающих потенциал в положительную сторону.



При сравнении значений стационарных потенциалов реакций (1-4) с реальными значениями (таблица), необходимо учитывать концентрационную поправку, которая согласно [2] может достигать 180-200 мВ. Кроме приведенных реакций, возможно протекание процесса диспропорционирования:



Образование четырехвалентных оксидов азота (NO_2 , N_2O_4) также способствует увеличению E_{cm} по сравнению с реакцией (1).

Хроновольтамперометрические измерения на Pt электроде показывают, что в катодной области при незначительном смещении от E_{cm} , отмечается подъем тока, связанный с восстановлением HNO_3 (рис. 1). Катодные ветви потенциодинамических кривых (ПДК) для платинового электрода имеют линейный вид и характеризуются совпадением прямого и обратного хода кривых. Отсутствие пиков на этих кривых вызвано тем, что восстановление HNO_3 при смещении потенциала идет с образованием различных продуктов (HNO_2 , оксидов азота, гидроксиламина и даже аммиака) [2,4]. Причем эти процессы накладываются друг на друга, протекая параллельно, и не имеют достаточно определенных границ по шкале потенциалов. Следует отметить высокую скорость данной реакции (до 1 A/cm^2), что согласуется с литературными сведениями [2,12].

Анодная часть циклической ПДК на платиновом электроде не обнаруживает процессов до начала выделения кислорода (рис. 1). Заметное газовыделение отмечается при потенциалах положительнее $1,65 \text{ В}$. Предварительная катодная поляризация на анодной ветви ПДК выявляет пик тока (рис. 1, б, кривая 3), природа которого может быть объяснена лишь присутствием на поверхности платины продуктов, наработанных в катодной области. Вероятно, данный процесс вызван обратным окислением HNO_2 и NH_4OH , так как эти соединения, по сравнению с другими возможными катодными продуктами, являются электрохимически активными и могут присутствовать на поверхности электрода в жидкофазном состоянии в достаточных количествах. Смещение потенциала в катодную область после регистрации анодного полуцикла показывает, что предварительная анодная обработка не оказывает влияния на ход катодной ветви.

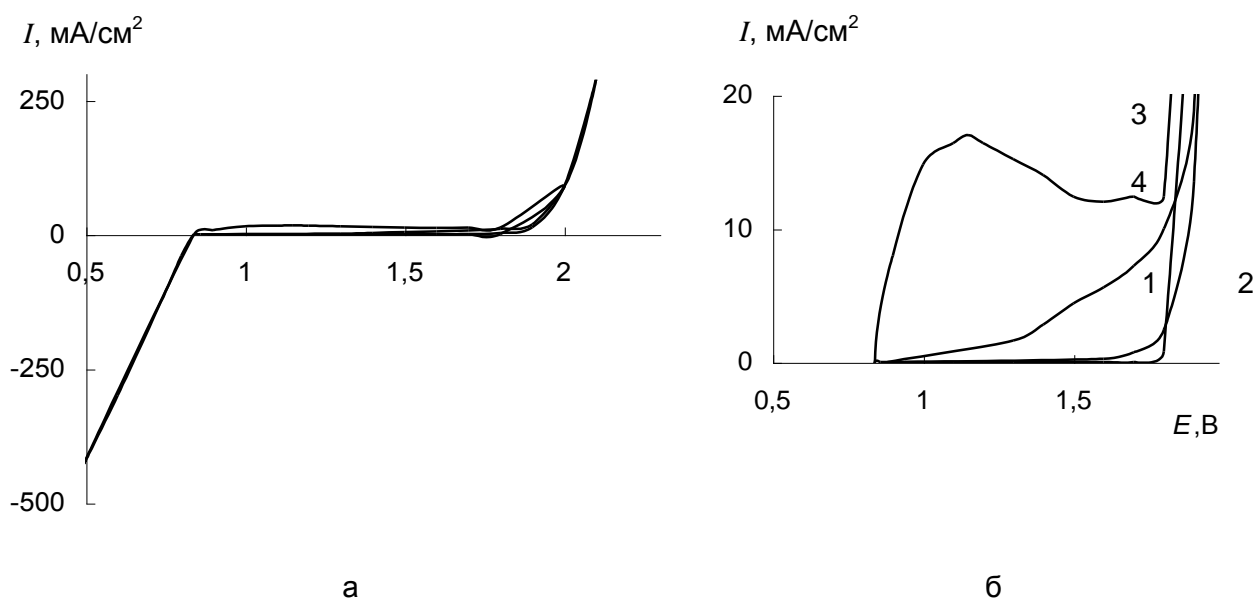


Рис. 1. Циклические ПДК для Pt электрода в 13,5 М растворе HNO_3 при $v=20 \text{ мВ/с}$, $t=24^\circ\text{C}$:
1, 2 – прямой и обратный ход кривых при развертке потенциала в анодную область;
3, 4 – прямой и обратный ход кривых при предварительной катодной поляризации

Характерные циклические ПДК для стального электрода представлены на рис. 2. Подъем тока в анодной области при потенциале 1,15-1,2 В свидетельствует о том, что, несмотря на высокие значения E_{cm} , сталь достаточно интенсивно растворяется, причем, в области потенциалов 1,9-2,0 В достигается состояние перепассивации, но при этом скорость анодного растворения металла остается весьма высокой. При смещении потенциала в катодную область после предварительной анодной поляризации увеличение токов отмечается при потенциалах 0,4-0,5 В (рис. 2, кривые 3, 4). В этой области потенциалов на стали принципиально возможно восстановление не только HNO_3 , но и поверхностных оксидных слоев. Однако, судя по значениям тока на анодных ветвях стального электрода, присутствующие на поверхности гидрооксиды имеют рыхлую структуру и не препятствуют окислению железа. Поэтому, в связи с тем, что электронная связь соединений железа с металлической основой электрода практически отсутствует, доля катодного тока, приходящегося на их восстановление, будет весьма мала. По сравнению с инертными материалами, в данном случае в катодной области следует ожидать смену механизма процесса. Согласно [1,16], при разрушении поверхностных оксидов, металл начинает химически взаимодействовать с азотной кислотой:



образуя азотистую кислоту, являющуюся катализатором восстановления азотной кислоты. Помимо этого, катионы металла из оксидной пленки будут также способствовать образованию HNO_2 [16]:

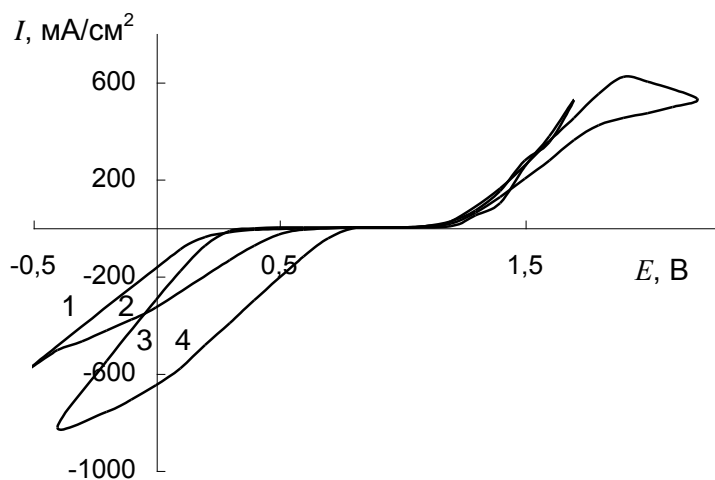


Рис. 2. Циклические ПДК для стального электрода в 13,5 М растворе HNO_3 при $v=20$ мВ/с, $t=24^\circ\text{C}$: 1, 2 – прямой и обратный ход кривых 1-го цикла; 3, 4 – соответственно прямой и обратный ход кривых 2-го цикла

По-видимому, именно протекание реакций (7), (8) объясняет наличие гистерезиса на катодных полуциклах. Различия в ходе катодных ПДК 1-го и 2-го циклов (рис. 2) вызваны увеличением коэффициента шероховатости электрода при его анодном окислении и увеличением степени депассивации вследствие разрыхления оксидных слоев и образования растворимых нитратов. По указанным причинам скорость реакции (8) будет возрастать, что приведет к снижению поляризации и росту скорости восстановления HNO_3 . Обобщая полученные данные, можно заключить, что в катодной и анодной областях потенциалов на стали присутствуют пассивные слои, которые в анодной области, хотя и затрудняют процесс растворения металла, но не предотвращают его интенсивного разрушения при значении потен-

циала выше 1,2 В. В катодной области, отрицательнее потенциалов 0,5 В, протекает восстановление HNO_3 с последующим смещением потенциалов по мере нарастания концентрации азотистой кислоты в при электродном слое до 0,8 В.

Циклические ПДК для титанового электрода (рис. 3) практически идентичны и мало отличимы от кривых, полученных для стали (рис. 2). По-видимому, природа процессов, протекающих на титановом электроде, такая же, как и описанная ранее на стальном.

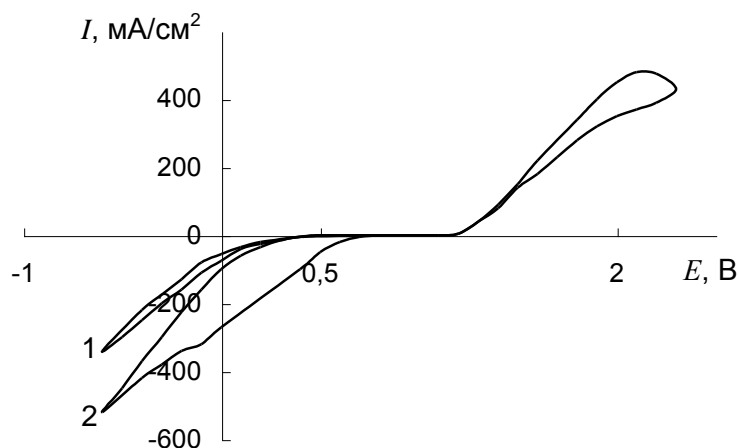


Рис. 3. Циклические хроновольтамперометрические кривые (1-го и 2-го циклов) для титанового электрода в 13,5 М растворе HNO_3 при ($v=20$ мВ/с, $t=24^\circ\text{C}$)

Предварительная обработка титанового электрода (механическая полировка поверхности и термообработка при $t=700^\circ\text{C}$) значительно изменяет вид циклических потенциодинамических кривых (рис. 4). В анодной области отсутствуют процессы растворения металла, и лишь при потенциалах выше 2,0 В отмечается увеличение тока, вызванное процессом выделения кислорода. В катодной области фиксируется незначительный пик тока при потенциалах 0,3-0,5 В, очевидно, связанный с восстановлением HNO_3 (рис. 4, б). И лишь при достижении значения потенциала $-0,2$ В начинают протекать значительные катодные токи, обусловленные реакцией образования водорода.

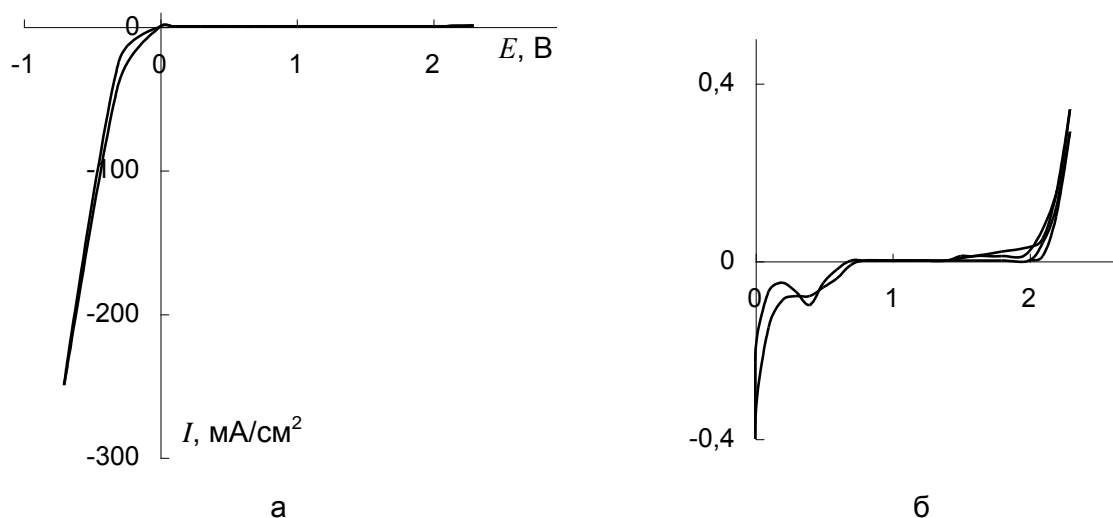


Рис. 4. Циклические хроновольтамперометрические кривые для термообработанного титанового электрода в 13,5 М растворе HNO_3 при $v=20$ мВ/с, $t=24^\circ\text{C}$

Анализируя ПДК (рис. 4), можно констатировать, что, подбирая режимы предварительной механической и термической обработок, можно создать на поверхности титана такую структуру оксидов, которая практически исключает возможность восстановления HNO_3 , но не препятствует выделению водорода с плотностями тока, достигающими $250\text{-}300\text{ мА/см}^2$. Полученный результат дает основание утверждать, что специально подготовленный титановый электрод может быть использован в качестве катода в реакторе электрохимического синтеза нитрата графита.

Выводы

Экспериментально подтверждено, что на всех исследованных электродах в катодной области основным процессом является восстановление азотной кислоты, протекающее с наложением при более отрицательных потенциалах реакции образования молекулярного водорода.

Положительные значения стационарных потенциалов для титана и стали свидетельствуют о том, что эти материалы находятся в пассивном состоянии и могут быть использованы в качестве конструкционных материалов.

Без предварительной специальной обработки титан и сталь не могут быть использованы в качестве электродных материалов в концентрированных растворах азотной кислоты.

Для титанового электрода подобраны режимы обработки, позволяющие подавить процесс восстановления азотной кислоты, но не препятствующие выделению водорода с достаточно высокой скоростью. Это создает определенные перспективы для разработки титанового катода электрохимического реактора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федорович Н.В. Электровосстановление анионов // Итоги науки и техники. Электрохимия. М.: ВИНТИ, 1979. Т.14. С. 5-56.
2. Исследование влияния температуры на процесс катодного восстановления азотной кислоты на платиновом электроде / Н.И. Алексеева, В.Б. Алесковский, Е.Г. Иванов, В.А. Никольский // Сборник работ по химическим источникам тока. Л.: ВНИАИ, 1969. Т.4. С. 221-231.
3. Финаенов А.И., Попова С.С. Исследование системы Al/HNO_3 , HCl/C при отрицательных температурах // Журнал прикладной химии. 1990. № 11. С. 2567-2570.
4. Фиошин М.Я. Современное состояние и перспективы развития электрохимического синтеза неорганических соединений // Итоги науки. Электрохимия. М.: ВИНТИ, 1971. Т.7. С. 150-213.
5. Ярошенко А.П., Попов А.Ф., Шапранов В.В. Технологические аспекты синтеза солей графита // Журнал прикладной химии. 1994. Т.67, № 2. С. 204-211.
6. Уббеллоде А.Р., Льюис Ф.А. Графит и его кристаллические соединения. М.: Мир, 1965. 256 с.
7. Reversibility of the intercalation of nitric acid in to graphite / P. Scharff, Z.-Y. Xut, E. Stumpp, K. Barteczko // Carbon. 1991. Vol.29, № 1. P. 31-37.
8. Миролубов Е.Н. Электрохимическое восстановление азотной кислоты на инертном и саморастворяющихся катодах // Журнал прикладной химии. 1962. Т.35, № 1. С. 132-138.
9. Хомутов Н.Е., Стамкулов У.С. Влияние материала катода на кинетику электровосстановления азотной кислоты // Электрохимия. 1971. Т.7, № 3. С. 332-336.
10. Черниловская А.И. Электрохимическое восстановление азотной кислоты на платиновом электроде // Гидрометаллургия цветных и редких металлов. Ташкент, 1971. С. 144-151.
11. Гурвич Л.Я., Жирнов А.Д. Исследование влияния температуры на коррозионную стойкость и электрохимические характеристики сталей и сплавов в красной дымящей азотной кислоте // Защита металлов. 1995. Т.31, № 5. С. 465-472.
12. Гурвич Л.Я., Жирнов А.Д. Коррозионная стойкость металлов в красной дымящей азотной кислоте // Защита металлов. 1996. Т.32, № 1. С. 18-22.

13. Разыграев В.П., Лебедева М.В., Панова О.А. Коррозия стали 12Х18Н10Т в горячих азотно-кислых растворах при катодной поляризации // Защита металлов. 1978. Т.14, № 6. С. 704-706.

14. Особенности коррозионного поведения хромоникельмолибденовых сталей в азотной кислоте / А.В. Пласкеев, В.М. Княжева, Т.А. Дергач, М.А. Дембровский // Защита металлов. 1978. Т.14, № 4. С. 393-400.

15. Добош Д. Электрохимические константы. М.: Мир, 1980. 365 с.

16. Феттер К. Электрохимическая кинетика. М.: Химия, 1967. 856 с.

Забудьков Сергей Леонидович –

аспирант кафедры «Технология электрохимических производств»
Энгельсского технологического института
Саратовского государственного технического университета

Яковлев Андрей Васильевич –

кандидат технических наук,
докторант кафедры «Технология электрохимических производств»,
доцент кафедры «Физическая и органическая химия»
Энгельсского технологического института
Саратовского государственного технического университета

Финаенов Александр Иванович –

доктор технических наук,
профессор кафедры «Технология электрохимических производств»
Энгельсского технологического института
Саратовского государственного технического университета

УДК 621.9.048.4

И.В. Родионов, С.К. Сперанский, Н.В. Протасова

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ФОРМИРОВАНИЯ АНТИРОТАЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА СТОМАТОЛОГИЧЕСКИХ ИМПЛАНТАТАХ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Проведены экспериментальные исследования по электроэрозионному формообразованию внутренних шестигранных элементов дентальных имплантатов методом искрового копирования. Показана целесообразность использования электроискровой технологии в производстве стоматологических имплантационных систем со сложными конструктивными элементами.

I.V. Rodionov, S.K. Speransky, N.V. Protasova

FEATURES OF ELECTROSPARK FORMATION OF ANTIROTATORY ELEMENTS ON ODONTOLOGICAL IMPLANTS OF THE CYLINDRICAL FORM

The experimental researches on electro erosive formation of internal hexahedral elements dental implants by a method of spark copying are carried out here. The expediency of use of electro spark technology in production odontological implantations of systems with difficult design elements is shown in the article.

Последнее десятилетие ознаменовалось бурным развитием имплантационной стоматологической практики во всем мире. Это связано с возросшими потребностями людей в замене утраченных зубов на искусственные имплантационные конструкции, позволяющие обеспечить как функциональные характеристики корней зубов, так и эстетику зубного ряда (рис. 1) [1].

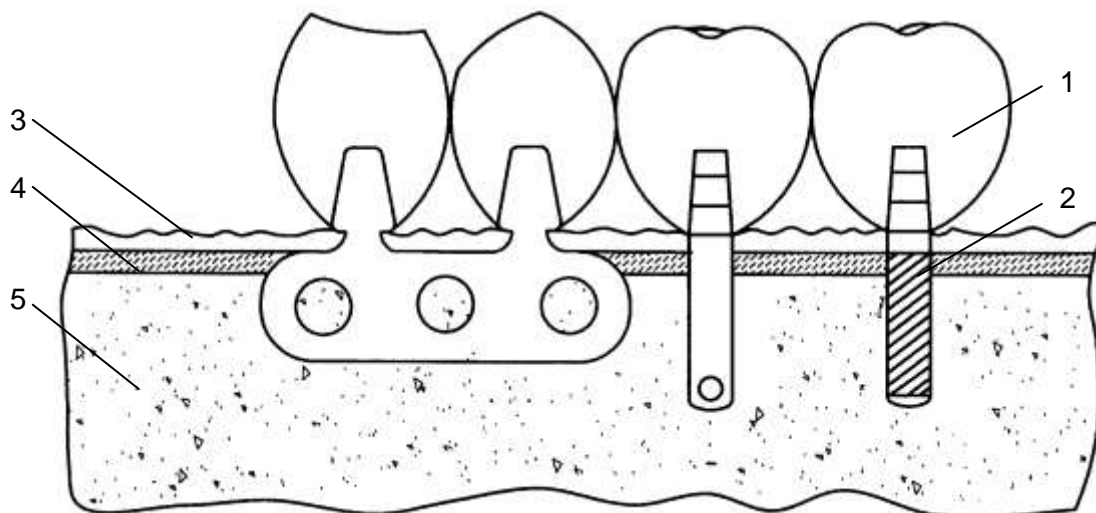


Рис. 1. Расположение пластиночного и цилиндрических имплантатов в кости челюсти:
 1 – зубной протез; 2 – имплантат; 3 – слизистая оболочка;
 4 – кортикальная (плотная) кость; 5 – губчатая кость

На сегодняшний день наибольшее распространение получили конструкции имплантатов в виде тел вращения, что обусловлено относительной простотой их установки в челюстное ложе пациентов без существенного травмирования и разрушения костных структур. Цилиндрические имплантационные конструкции состоят, как правило, из, собственно, самого имплантата (тела) и так называемой супраструктуры, на которой фиксируется зубной протез (рис. 2). При этом необходимо обеспечить прочную фиксацию супраструктуры в теле имплантата, которая обычно реализуется в виде резьбового соединения (рис. 2). Как показывает клиническая практика, такое соединение является недостаточно эффективным для противодействия ротационным жевательным нагрузкам, поэтому в настоящее время в современной имплантационной практике широко используют конструкции имплантатов с различными антиротационными системами, которые являются основными функциональными элементами, воспринимающими жевательные нагрузки. Нередко данные элементы определяют и срок службы имплантатов, в связи с чем сегодня активно проводятся исследования по повышению их качества, а также совершенствованию технологических процессов высокоточного формообразования малогабаритных изделий медицинского назначения. Наиболее распространенной и эффективной антиротационной системой считается сопряженный комплекс шестигранных элементов, формируемых на имплантате и супраструктуре, причем внешний шестигранник супраструктуры фиксируется во внутреннем имплантате (рис. 3). Необходимыми критериями их прочного взаимодействия являются высокая точность конструктивных размеров и требуемая чистота поверхности.

Вследствие малых размеров имплантатов формирование на них шестигранных элементов является довольно трудной технологической задачей и использование при этом методов механической обработки не всегда эффективно, а зачастую и нереализуемо. В частности, из-за высокой пластичности имплантационных материалов происходит значительная деформация металла, сопровождающаяся изменением размеров шестигранника и образованием на его поверхности различных борозд и заусенцев (рис. 4), что говорит о

необходимости применения дополнительных доводочных операций. В этом плане наиболее эффективными можно считать электрофизические методы обработки, а именно электроэрозионное формообразование, позволяющее обеспечивать высокую точность размеров (до 3-5 мкм) и качество получаемой поверхности [2-4].

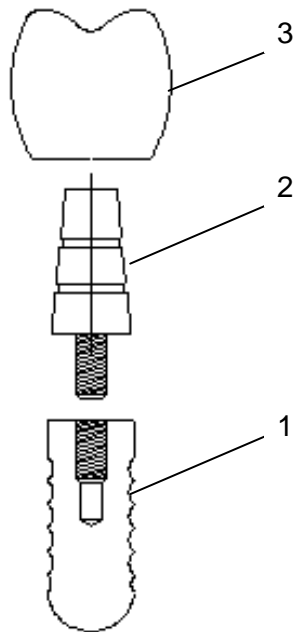


Рис. 2. Схема имплантационно-протезной системы с резьбовым соединением супраструктуры: 1 – имплантат; 2 – супраструктура; 3 – зубной протез

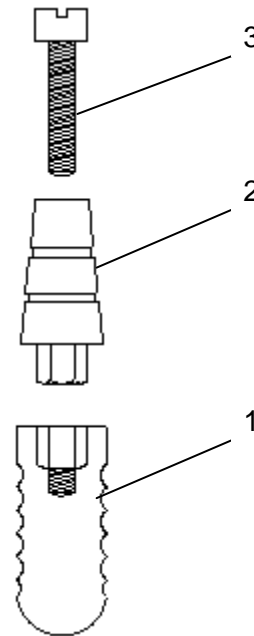
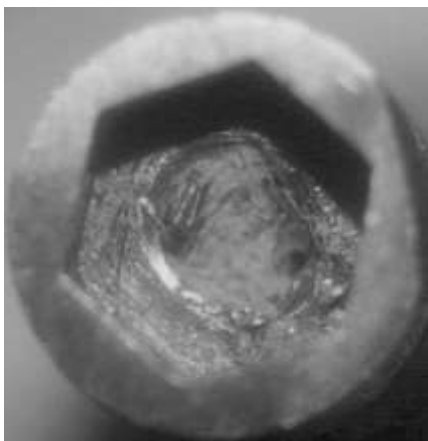
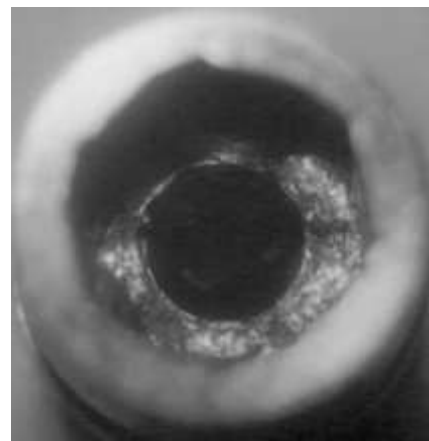


Рис. 3. Антиротационная шестигранная система имплантата и супраструктуры: 1 – имплантат; 2 – супраструктура; 3 – крепежный винт



а



б

Рис. 4. Внутренние шестигранники титановых имплантатов после механического формообразования (x48)

Методика эксперимента. Объектом эксперимента служили цилиндры из титана марки BT1-00, широко применяемого в производстве имплантатов, с диаметром $d=7$ мм и длиной $l=10$ мм, которые перед электроэрозионной обработкой закреплялись в специальной оснастке,

размещенной на дне ванны установки для прошивочно-копировальных операций СЭП.Р-6.5-002. Электроэрозионный процесс реализовывали в двух рабочих жидкостях: керосине и дистиллированной воде. Затем проводили сравнительный анализ качества эрозионной поверхности (по степени шероховатости и загрязнения) и производительности процесса обработки. Формообразование шестигранников осуществляли методом прямого копирования в высокочастотном искровом режиме ($f=22$ кГц) с принудительной подачей рабочей жидкости в межэлектродный промежуток (рис. 5). В качестве инструмента использовали двухступенчатые латунный и титановый (ВТ1-00) электроды, причем рабочая часть электродов соответствовала форме шестигранника, что является необходимым условием для формирования соответствующей полости на заготовке. Ультразвуковую очистку титановых образцов, обработанных в керосине, осуществляли на специализированной экспериментальной установке, применяя спиртовой моющий раствор. Очистку производили при следующих технологических режимах: частота ультразвуковых колебаний $f=22$ кГц, время очистки $\tau=3-8$ минут. Исследования параметров шероховатости эрозионной поверхности шестигранника осуществляли на микропроцессорном профилографе-профилометре «Калибр-171011» по 15 базовым линиям. Состояние и морфологию обработанной поверхности изучали при помощи микроскопов МБС-1 и МИМ-7. Эрозионный износ электродов-инструментов оценивали методом микрометрии по разнице их длин до и после искровой обработки.

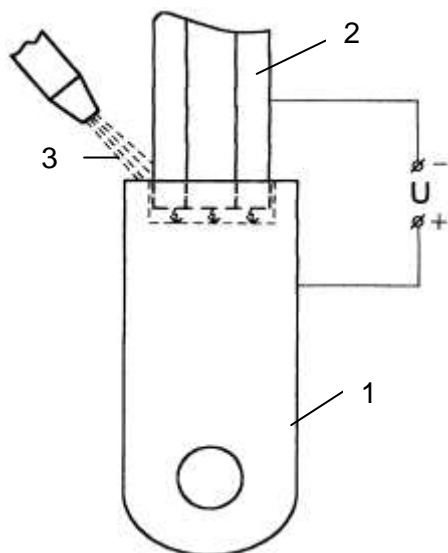


Рис. 5. Схема электроискрового формирования внутреннего шестигранника:
1 – заготовка цилиндрического имплантата;
2 – шестигранный электрод-инструмент;
3 – рабочая жидкость

Результаты исследований и их анализ. С помощью оптико-микроскопического анализа установлено, что шестигранные полости, сформированные на цилиндрических титановых образцах электроискровым методом (рис. 6), отличаются от механически сформированных (рис. 4) отсутствием на поверхности различных макронеровностей, трещин, борозд и заусенцев при соблюдении высокой точности конструктивных размеров. Кроме того, при искровой обработке исключаются условия деформации металла, т.к. его съем осуществляется за счет импульсной тепловой энергии электрических разрядов.

В результате оптических наблюдений выявлено, что структура эрозионной поверхности шестигранника обладает ярко выраженными морфологическими особенностями, заключающимися в довольно развитом микрорельефе (рис. 7, а,б), который определяет степень шероховатости и зависит от технологических параметров и условий обработки. Анализ микрофотографий (рис. 7, а,б) и микрошлифов (рис. 7, в,г) показал, что обработанная поверхность шестигранника носит так называемый «луночный» характер, являющийся следствием локального разрушения металла под действием импульсных искровых разрядов. От параметров электрических разрядов существенным образом зависит глубина лунок, которая, в основном, и определяет шероховатость поверхности и оценивается в профилометрии параметром R_z .

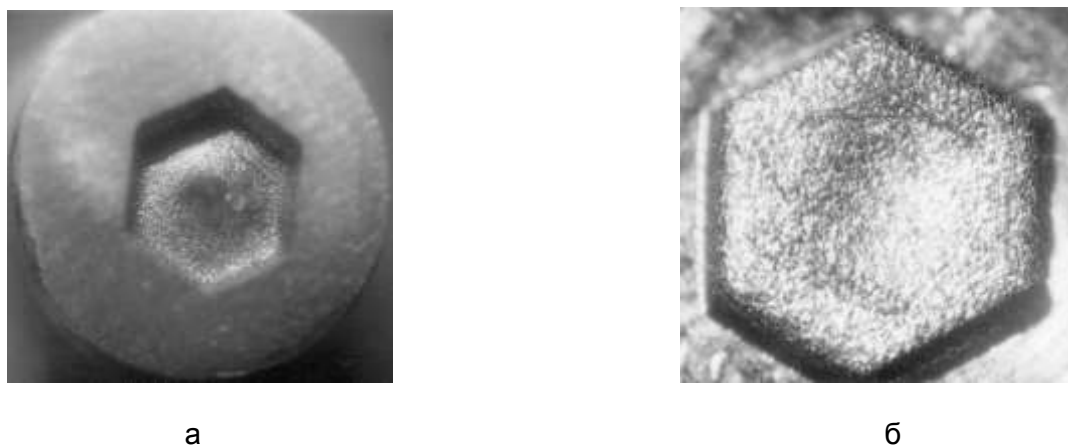


Рис. 6. Внутренние шестигранники на титановых образцах после копировально-искрового формообразования: а – х30; б – х48

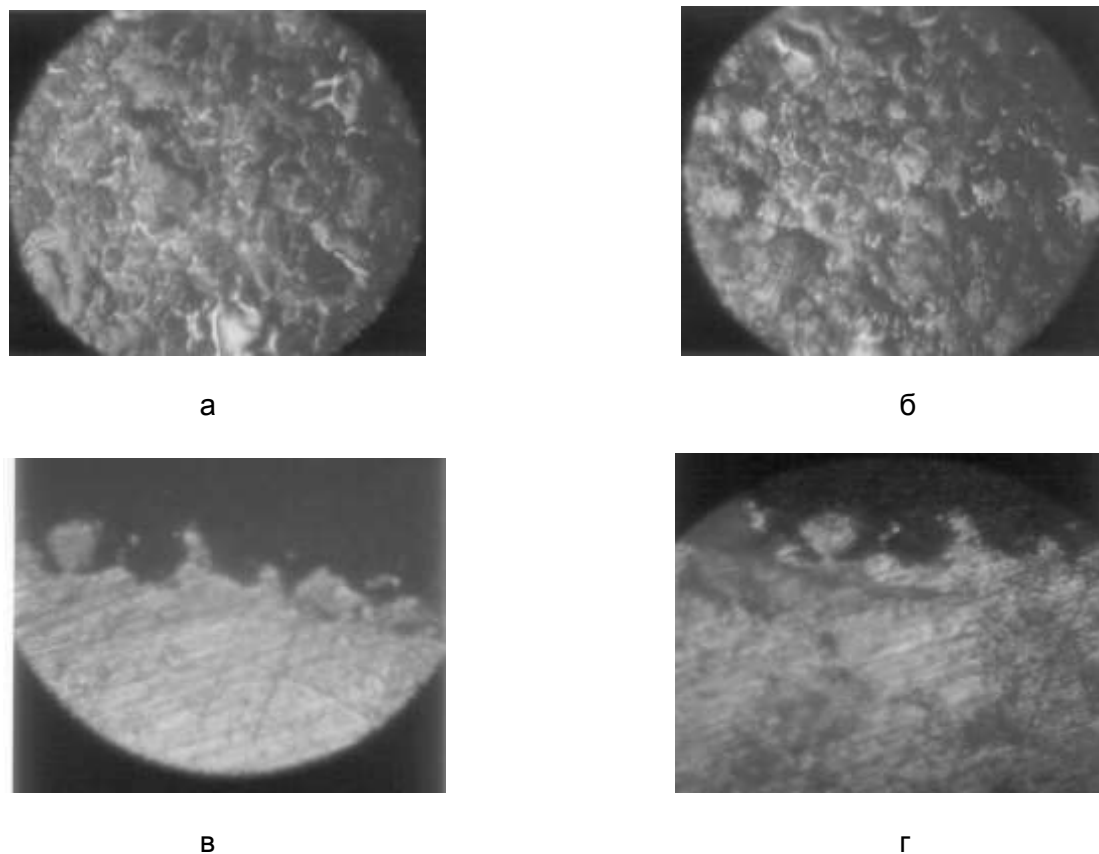


Рис. 7. Эрозионная поверхность (а, б) и микрошлифы (в, г) фрагментов шестигранника после электроискрового формообразования (х190)

Так как процесс искровой обработки протекает в жидкой диэлектрической среде, в роли которой выступают, как правило, специальные масла или керосин (в ряде случаев и дистиллированная вода), то рабочая среда выступает не только в роли эвакуатора продуктов эрозии, но и в качестве сильного загрязнителя изделия отдельными ее компонентами. В результате визуальных, макро- и микроскопических исследований шестигранников было обнаружено значительное загрязнение их поверхностей компонентами рабочей керосиновой среды (рис. 8). Данные загрязнения образуются на поверхности в виде пленки с темно-бурым оттенком.

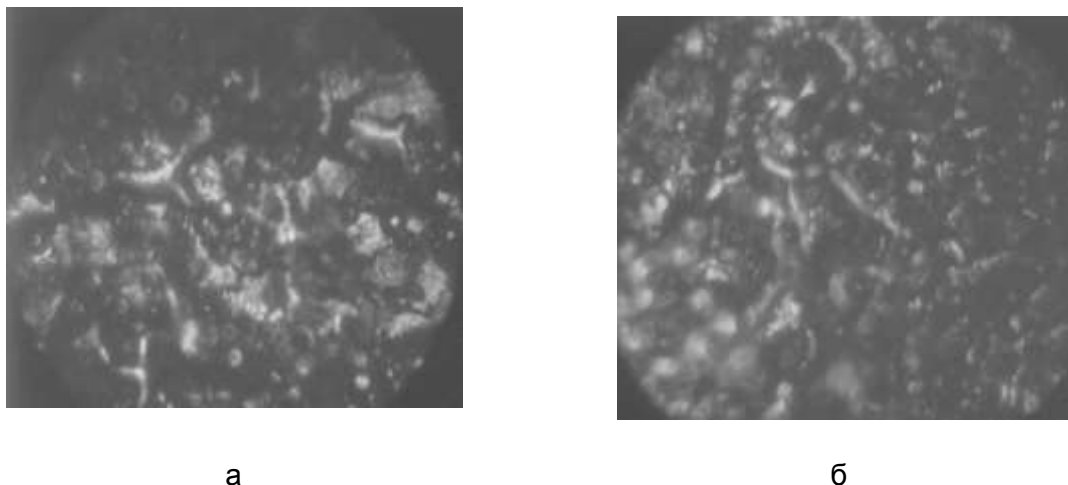


Рис. 8. Жировое загрязнение поверхности шестигранника при электроискровой обработке титановой заготовки в керосине (x190)

Такие загрязняющие поверхностно-жировые пленки значительно снижают качество получаемых изделий, особенно это относится к изделиям медицинского назначения, которые непосредственно либо функционируют в биологических структурах (в частности, внутрикостные стоматологические имплантаты), либо с ними контактируют (медицинские инструменты).

Присутствие на поверхности шестигранных элементов загрязнителя нежелательно с медицинской и биологической точек зрения, так как это способствует быстрому развитию в зоне контакта супраструктуры и имплантата различных микроорганизмов (вследствие хорошей питательной среды), которые, размножаясь, обуславливают риск возникновения воспалительных процессов, что может привести к отеку и раздражению прилегающих к имплантационной системе тканей и усложнению реабилитационных процессов в целом. Появление опухолеобразования нередко создает предпосылку к удалению имплантатов из челюстной кости пациентов. Вследствие этого наличие жировых загрязняющих пленок на изделиях медицинского назначения обуславливает серьезнейшую медико-техническую задачу по их эффективному устранению.

В современной промышленности используют специальные методы очистки поверхности от технологических загрязнений: травление, ультразвуковую очистку (обезжиривание), термическую и плазмо-химическую обработку и другие. Для изделий медицинского назначения эффективным методом очистки можно считать ультразвуковое обезжиривание, позволяющее на качественном уровне производить локальное разрушение и удаление пленок как органической, так и неорганической природы.

В ходе экспериментальных исследований по ультразвуковой очистке поверхностей шестигранников, сформированных в среде керосина, нами установлено, что образующиеся на металле загрязняющие жировые пленки прочно с ним связаны. Как видно из микрофотографий (рис. 9), эрозионная поверхность после УЗ-очистки еще достаточно сильно загрязнена (темно-бурые области). Разрушение и удаление пленки носит локальный характер (светлые области), причем эффективность процесса очистки проявилась особенно на тех участках, где пленка, по-видимому, была наименее прочно связана с металлом. Анализируя поверхности, представленные на рис. 9, можно заключить, что качественное удаление загрязнений происходит именно на выступах неровностей, там связь пленки с металлом механически менее прочна. В лунках же отчетливо видны остатки не удаленных компонентов керосина. Это непосредственно связано с развитием большой удельной поверхности при электроискровой обработке, которая обеспечивает прочную механическую связь пленки в донных частях неровностей. Именно относительно глубоких микровпадин процесс ультразвуковой очистки

значительно затруднен, так как в связи со сложными морфологическими особенностями эрозионной поверхности проникновение кавитационных пузырьков в микронеровности носит сильно ограниченный характер.

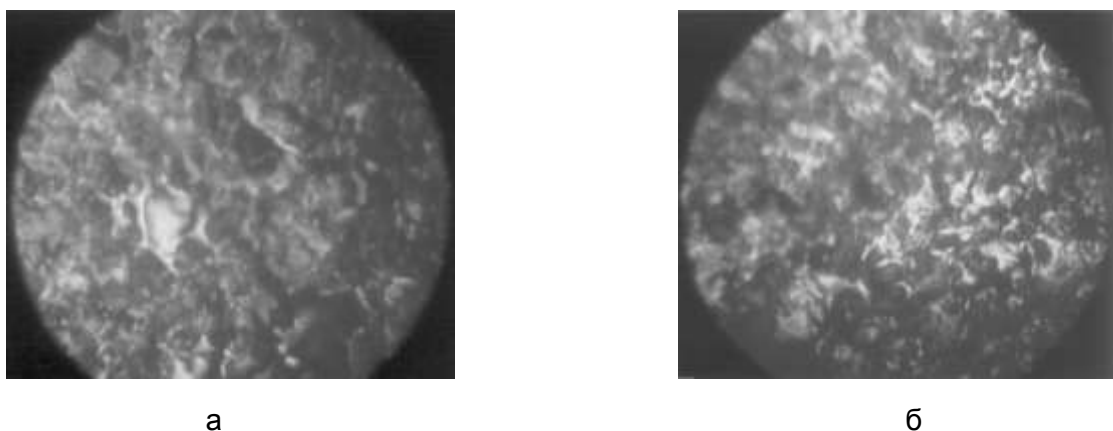


Рис. 9. Участки эрозионной поверхности шестигранника после УЗ-очистки (x190)

При искровом формообразовании шестигранных элементов в дистиллированной воде возможность их жирового загрязнения практически исключается, о чем свидетельствует яркий металлический блеск эрозионной поверхности (рис. 10). Это является преимущественным технологическим фактором. Кроме этого, достоинством электроискрового формообразования шестигранников в дистиллированной воде является и довольно высокая производительность, обусловленная эффективным удалением продуктов эрозии из обрабатываемой зоны. По отношению к керосину и ряду специальных масел здесь эвакуация отработанных частиц из межэлектродного промежутка менее затруднена, вследствие меньшей вязкости жидкости. К числу достоинств также можно отнести исключение пожаро- и взрывоопасности рабочей среды, снижение влияния на оператора вредных испарений и экологическую чистоту производства.

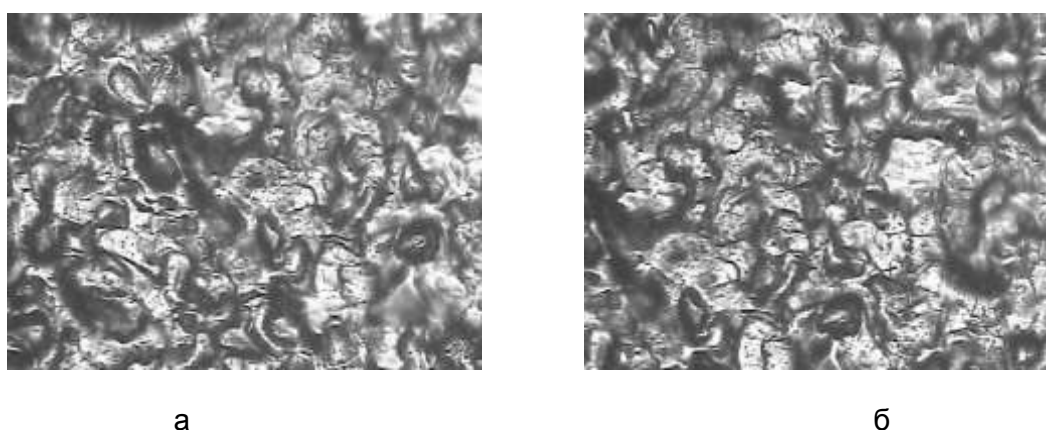


Рис. 10. Участки эрозионной поверхности шестигранника после искровой обработки в дистиллированной воде (x300)

Как показали данные профилометрических исследований, тип жидкости оказывает влияние и на степень шероховатости эрозионной поверхности шестигранника, причем существенную роль здесь играют материал электрода-инструмента и глубина обработки. На рис. 11 представлены результаты статистических профилометрических измерений поверхности шестигранника, сформированного в среде керосина и дистиллированной воды латунным инструментом, причем

измерения проводились относительно глубины полости ($h=3$ мм) по направлению от внешней ее кромки к основанию. Из этих данных видно, что по мере увеличения глубины формирования шестигранника существенно повышается и степень шероховатости эрозионной поверхности, в частности, отчетливо наблюдается рост R_a , R_z , R_{max} при практически неизменном S_m . Здесь следует отметить, что применение дистиллированной воды приводит к снижению шероховатости в среднем на 10% по отношению к обработке в керосиновой среде.

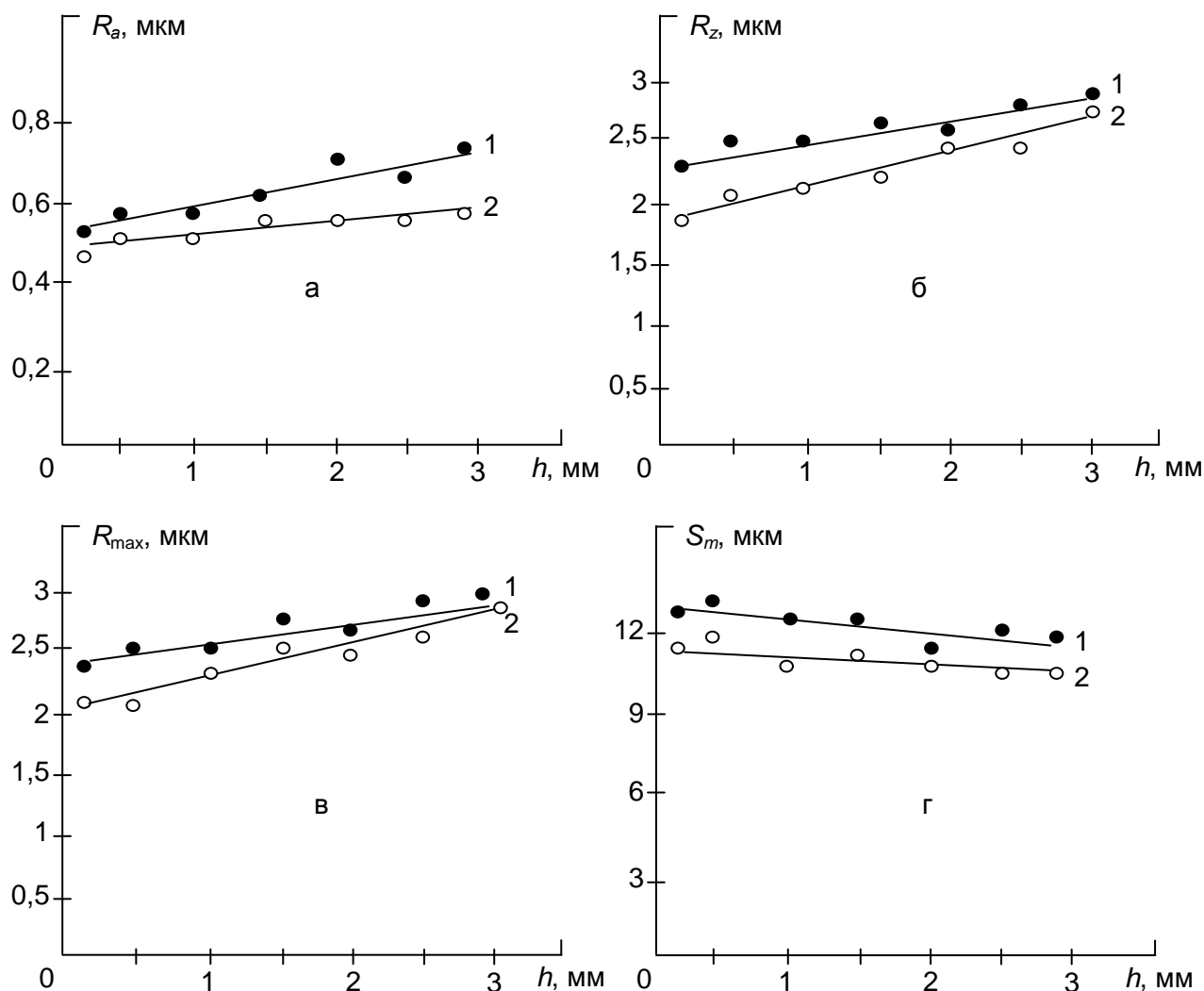


Рис. 11. Изменение профилометрических параметров шероховатости R_a (а), R_z (б), R_{max} (в), S_m (г) эрозионной поверхности шестигранника в зависимости от его глубины: 1 – керосин; 2 – дистиллированная вода (электрод-инструмент – латунь)

Подобные результаты наблюдаются и при использовании титанового электрода-инструмента. По данным рис. 12 можно заключить, что увеличение глубины обработки также сопровождается повышением шероховатости обрабатываемой поверхности и, как следствие, снижением ее качества. Но необходимо отметить, что применение титанового инструмента и дистиллированной воды способствует уменьшению степени шероховатости поверхности по отношению к обработке латунным инструментом.

Такое монотонное повышение шероховатости по мере увеличения глубины формообразования (рис. 11, 12) объясняется повышением концентрации отработанных частиц металла в межэлектродной зоне, эвакуация которых, вследствие малого межэлектродного зазора,

затруднена, что приводит к частым коротким замыканиям электродов и привариванию частиц к их поверхностям. Поэтому рабочую жидкость при электроэрозионном формировании отверстий и полостей на малогабаритных изделиях следует подавать проточно.

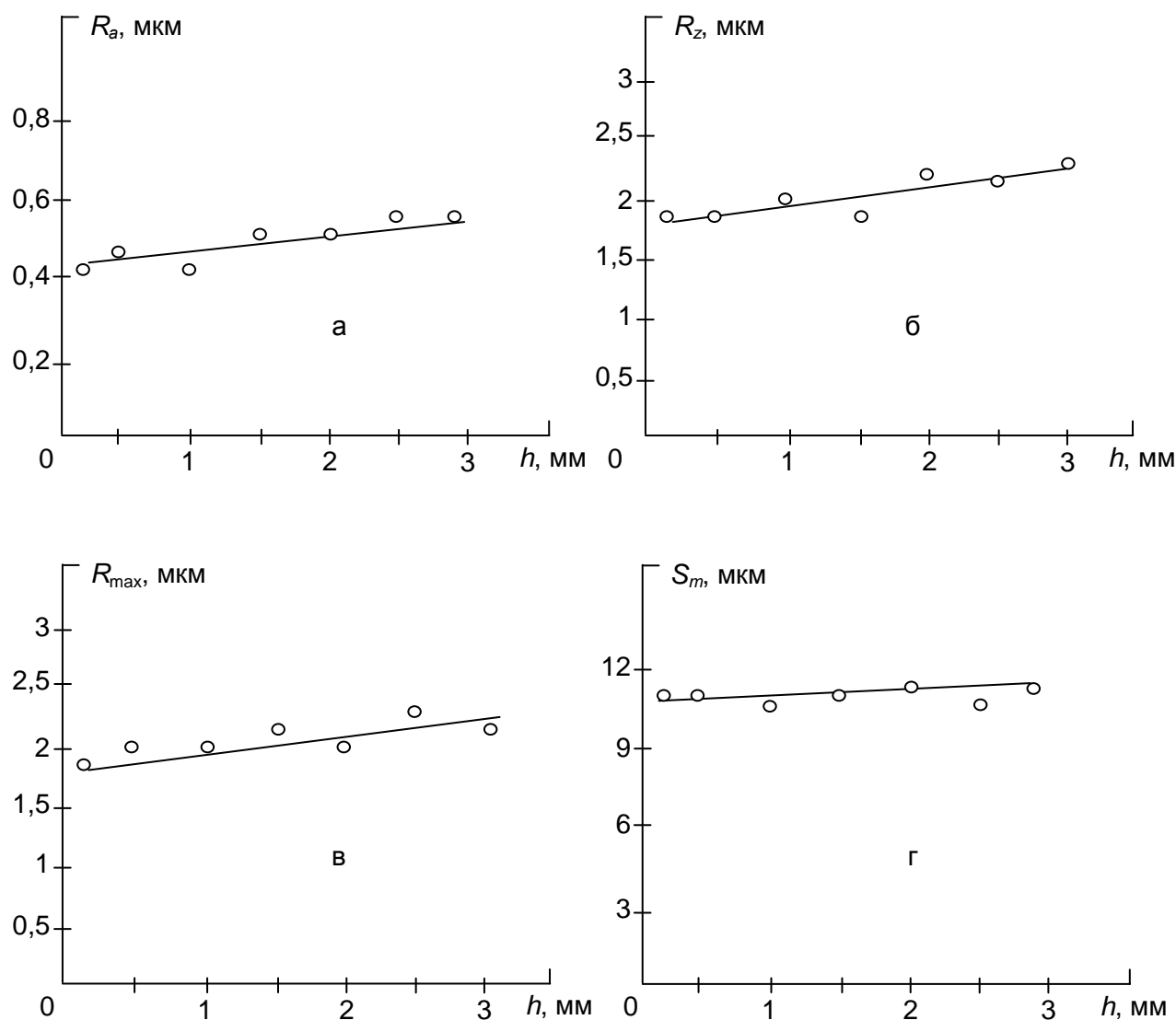


Рис. 12. Изменение профилометрических параметров шероховатости R_a (а), R_z (б), R_{max} (в), S_m (г) эрозионной поверхности шестигранника в зависимости от его глубины (электрод-инструмент – титан ВТ1-00; рабочая среда – дистиллированная вода)

В целом результаты проведенных профилометрических исследований представлены в виде гистограммы на рис. 13, из которой хорошо видно, что применение титановых электродов-инструментов и дистиллированной воды в электроэрозионном производстве цилиндрических имплантатов с шестигранными элементами является вполне целесообразным, так как ведет к снижению шероховатости по параметрам R_a , R_z , R_{max} в среднем на 14%. Обработка же латунным инструментом в дистиллированной воде уменьшает шероховатость по отношению к керосину на 10%.

Эффективность электроэрозионного производства имплантатов определяется технологичностью самого процесса обработки, которая в значительной мере характеризуется и износостойкостью рабочего инструмента, поэтому мы провели исследования по определению степени эрозионного износа применяемых в эксперименте электродов. Оценка эрозионного

износа латунного и титанового инструментов проводилась в зависимости от глубины обработки шестигранника, которая для реально изготовленных титановых имплантатов составляет 2 мм. Износ определялся микрометрически по изменению линейных размеров электродов, в частности, разницей длин до $l_{нач}$ и после $l_{кон}$ обработки, составляющей величину $l_{изн}$.

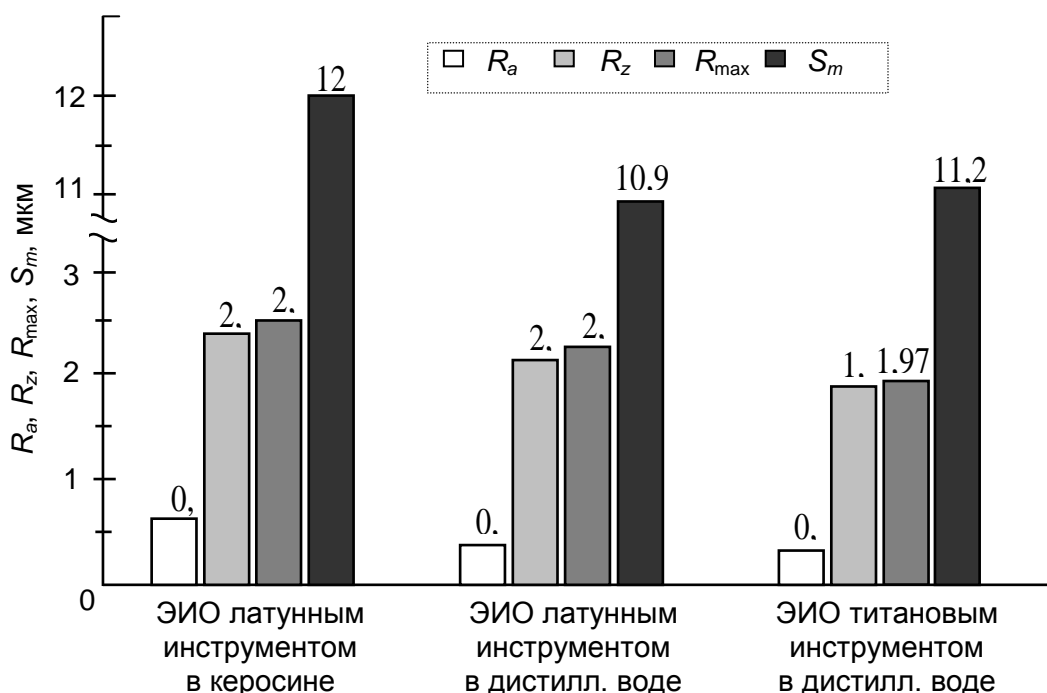


Рис. 13. Влияние рабочей среды и материала электрода-инструмента на параметры шероховатости шестигранника при электроискровой обработке титановых имплантатов

При формировании шестигранника глубиной $h=2$ мм латунным инструментом с $l_{нач}=49,2$ мм и $d_{раб}=2,8$ мм относительная величина линейного износа составила $l_{изн}=0,5$ мм

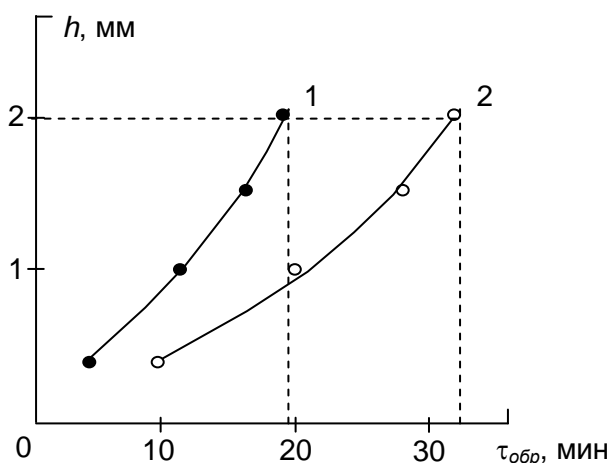


Рис. 14. Экспериментальные зависимости $h - \tau_{обр}$ титановой заготовки для различных электродов, полученные при обработке в дистиллированной воде: 1 – латунный электрод; 2 – титановый электрод

при $l_{кон}=48,7$ мм, а при обработке титановым с $l_{нач}=50,8$ мм, $l_{кон}=49,2$ мм и $d_{раб}=2,8$ мм она значительно повысилась до $l_{изн}=1,6$ мм, из чего можно сделать вывод, что титановый ВТ1-00 инструмент изнашивается интенсивнее латунного примерно в 3 раза. Тем самым, принимая длину и диаметр применяемой рабочей части обоих инструментов равными $l_{раб}=3$ см и $d_{раб}=2,8$ мм, можно рассчитать количество заготовок имплантатов, обработанных одним электродом до полного его износа. При одинаковых конструктивных размерах инструментов и технологических режимах обработки это количество составляет: для латунного электрода – $Q=60$ шт, для титанового – $Q=18$ шт. Время же, затрачиваемое на обработку одной титановой заготовки, как это показано на рис. 14, соответствует: для латунного электрода порядка $\tau_{обр}=18$ мин, для титанового – $\tau_{обр}=34$

мин, т.е. формирование шестигранника латунным электродом реализуется в 2 раза быстрее, чем титановым.

В связи с этим, с точки зрения производительности, вполне целесообразна рекомендация по использованию латунных электродов-инструментов в мелкосерийном производстве титановых дентальных имплантатов с шестигранными антиротационными элементами. Но с точки зрения технологической чистоты получаемой поверхности и комплекса биотехнических и медицинских требований, предъявляемых к имплантатам, наиболее эффективными можно считать титановые инструменты, время обработки $\tau_{обр}$ заготовок которыми является вполне приемлемым в маршрутной технологии изготовления имплантатов.

Электрический износ электродов сопровождается изменением профиля рабочей поверхности, который в результате эрозионных процессов значительно деформируется, приобретая при этом явно выраженный морфологический характер (рис. 15). Это объясняется тем, что тепло, выделяемое электрическими разрядами, в равной степени воздействует как на материал заготовки, так и инструмента, вследствие чего на поверхности образуются зоны локального эрозионного разрушения. Степень износа для различных материалов электродов определяется их структурными особенностями и теплофизическими свойствами, а также технологическими параметрами и условиями обработки.

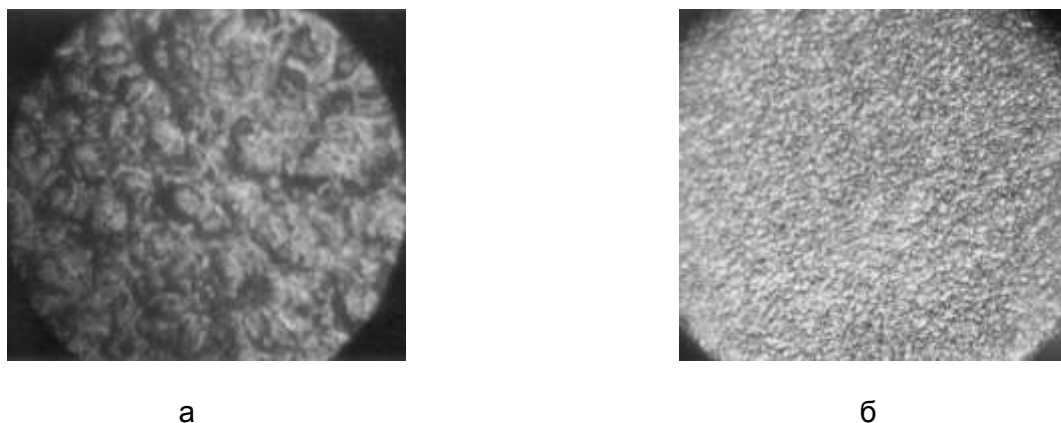


Рис. 15. Поверхность электродов после искровой обработки:
а – латунный электрод (x150); б – титановый электрод (x48)

В целом, результаты проведенных экспериментальных исследований позволили определить ряд важных, с точки зрения качества и эффективности производства имплантатов, параметров электроискрового формообразования, которые являются рекомендуемыми для обработки титана ВТ1-00, широко применяемого в имплантологии (см. таблицу).

Параметры электроискрового формообразования внутренних шестигранников титановых имплантатов ВТ1-00

| Вид операции | $I_{к.з.},$ мА | $U, В$ | Рабочая среда | Материал инструмента | Статистические параметры шероховатости, мкм | | | Глубина шестигранника, мм | Время обработки одной заготовки, ч |
|--------------------|-------------------|--------|-----------------------|----------------------|---|-----------|-------|---------------------------|------------------------------------|
| | | | | | R_z | R_{max} | S_m | | |
| прямое копирование | 20-30 | 30-50 | дистиллированная вода | титан ВТ1-00 | 1,9 | 2 | 11 | 2 | ~ 0,5 |

Выводы

1. Исследован процесс искрового формообразования шестигранных антиротационных элементов на цилиндрических титановых имплантатах и выяснено, что электроискровой копировальный метод обработки позволяет формировать довольно сложные и высококачественные конструктивные элементы на малогабаритных изделиях медицинского назначения.

2. Экспериментально установлено влияние типа рабочей жидкости, материала электрода-инструмента и глубины формообразования на степень шероховатости и загрязнения эрозионной поверхности имплантационных шестигранников и показано, что применение дистиллированной воды и титановых (BT1-00) инструментов в электроэрозионном производстве стоматологических имплантатов является весьма целесообразным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Конструирование, производство и применение внутрикостных стоматологических имплантатов: Учеб. пособие. Ч. I / Н.В. Бекренев, Н.В. Протасова, И.В. Родионов, А.В. Лясникова; Под ред. В.Н. Лясникова. Саратов: СГТУ, 2003. 76 с.

2. Исследование электроэрозионного формообразования шестигранных элементов на денальных имплантатах / И.В. Родионов, Н.В. Протасова, В.Н. Лясников, А.И. Шумилин / Современные проблемы имплантологии: Сб. науч. статей 7-й Междунар. конф. Саратов: СГТУ, 2004. С. 108-112.

3. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: Учеб. пособие. Ч. 1. Обработка материалов с применением инструмента / Б.А. Артамонов, Ю.С. Волков, В.И. Дрожалова и др.; Под ред. В.П. Смоленцева. М.: Высшая школа, 1983. 247 с.

4. Немилов Е.Ф. Электроэрозионная обработка материалов. Л.: Машиностроение, 1983. 160 с.

Родионов Игорь Владимирович –

кандидат технических наук,
ассистент кафедры «Материаловедение и высокоэффективные процессы обработки»
Саратовского государственного технического университета

Сперанский Сергей Константинович –

кандидат технических наук,
доцент кафедры «Материаловедение и высокоэффективные процессы обработки»
Саратовского государственного технического университета

Протасова Наталья Владимировна –

кандидат технических наук,
докторант кафедры «Материаловедение и высокоэффективные процессы обработки»
Саратовского государственного технического университета

ЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

УДК 621.385.01

Н.Ю. Хороводова, В.Б. Байбурин**ХАОТИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ В МАГНЕТРОННОМ ДИОДЕ
С ПРОСТРАНСТВЕННО НЕОДНОРОДНЫМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ
И МАГНИТНЫМ ПОЛЯМИ**

Проведено численное исследование характера движения зарядов в магнетронном диоде в условиях пространственно неоднородных электрического и магнитного полей. На основе расчёта показателей Ляпунова определены области существования хаотического поведения системы.

N.Yu. Khorovodova, V.B. Bayburin**CHAOTIC REGIMS IN THE MAGNETIC DIODE WITH SPATIALLY NON-UNIFORM
ELECTRICAL AND MAGNETIC FIELDS**

The article shows a numerical research of character of movement of charges in the magnetic diode in conditions of spatially non-uniform electrical and magnetic fields. There are determined areas of existence of chaotic behaviour of system on the basis of calculation of Liapunov parameters which are demonstrated here as well.

В настоящее время имеется ряд работ по исследованию колебательных режимов в динамической системе «заряд в скрещенных электромагнитных полях». Значительное внимание уделяется возможности возникновения хаотической динамики движения зарядов в рассматриваемой системе в условиях неоднородных электромагнитных полей. Так, в работе [1] было показано, что радиальная неоднородность магнитного поля оказывает существенное влияние на характер траекторий заряженных частиц. Хаотическая динамика подтверждается и результатами работы [5], в которой рассматривалось влияние на электронные траектории изменяющегося по углу магнитного поля. В меньшей степени исследовались условия возникновения хаотических колебательных режимов в условиях пространственно неоднородного электрического поля.

В данной работе предлагается рассмотреть некоторые особенности динамики движения зарядов в скрещенных полях магнетронного диода с учётом изменяющегося по углу электрического поля.

В прямоугольной системе координат уравнение движения заряда в скрещенных полях магнетронного диода можно представить в следующем виде:

$$\begin{cases} \frac{d^2x}{dt^2} = E + \Omega \frac{dy}{dt} \\ \frac{d^2y}{dt^2} = -\Omega \frac{dx}{dt}, \end{cases} \quad (1)$$

где E – функция, описывающая электрическое поле магнетронного диода; Ω – циклотронная частота.

Системе уравнений (1) можно поставить в соответствие фазовое пространство с фазовыми переменными $x, y, V_x = dx/dt, V_y = dy/dt$.

Для электрического поля предлагается рассмотреть следующие зависимости:

$$E_{x,y} = \frac{U_0}{\ln\left(\frac{r_a}{r_k}\right)\sqrt{x^2 + y^2}} + \Delta E \sin(\alpha); \quad (2)$$

$$E_{x,y} = \frac{U_0}{\ln\left(\frac{r_a}{r_k}\right)\sqrt{x^2 + y^2}} + \Delta E \sin(2\alpha); \quad (3)$$

$$E_{x,y} = \frac{U_0}{\ln\left(\frac{r_a}{r_k}\right)\sqrt{x^2 + y^2}} + \Delta E \sin(4\alpha). \quad (4)$$

Для определения величин фазовых переменных использовался неявный метод, изложенный в [3]. Все расчёты проводились в безразмерных единицах.

В качестве начальных значений параметров электромагнитных полей были выбраны следующие: $\Omega=1, U_0=1$; значение параметра ΔE выбирается равным значению напряжённости электрического поля на катоде, т.е. $\Delta E = \frac{U_0}{r_k \ln\left(\frac{r_a}{r_k}\right)}$, где $r_a=10$ – радиус анода, $r_k=0,5$ – радиус катода.

Начальные значения фазовых переменных V_{x0}, V_{y0} полагались равными нулю.

Для оценки степени хаотичности системы использовались данные расчёта показателей Ляпунова и спектра мощности. Результаты представляются в удобной визуальной форме в виде карт динамических режимов в плоскости параметров (X, Y) . Белый цвет соответствует отрицательным значениям показателя Ляпунова, градации серого (от светлого до тёмного) – различным положительным значениям показателя.

Для областей, окрашенных в белый цвет, характерна регулярная динамика. Траектории, стартующие при практически одинаковых начальных условиях, по существу совпадают (рис. 1, а). Тёмные области свидетельствуют о наличии хаотических режимов в движении заряженных частиц. При той же незначительной разнице в начальных условиях траектории с течением времени значительно расходятся (рис. 1, б).

На рис. 2 представлены карты динамических режимов в плоскости параметров (X, Y) , рассчитанные для различных зависимостей электрического поля от координат и азимута (2)-(4).

Для анализа полученных результатов представим карту динамических режимов, рассчитанную для случая, когда электрическое поле изменяется только по радиусу, т.е.

$$E_{x,y} = \frac{U_0}{\ln\left(\frac{r_a}{r_k}\right)\sqrt{x^2 + y^2}}. \quad (5)$$

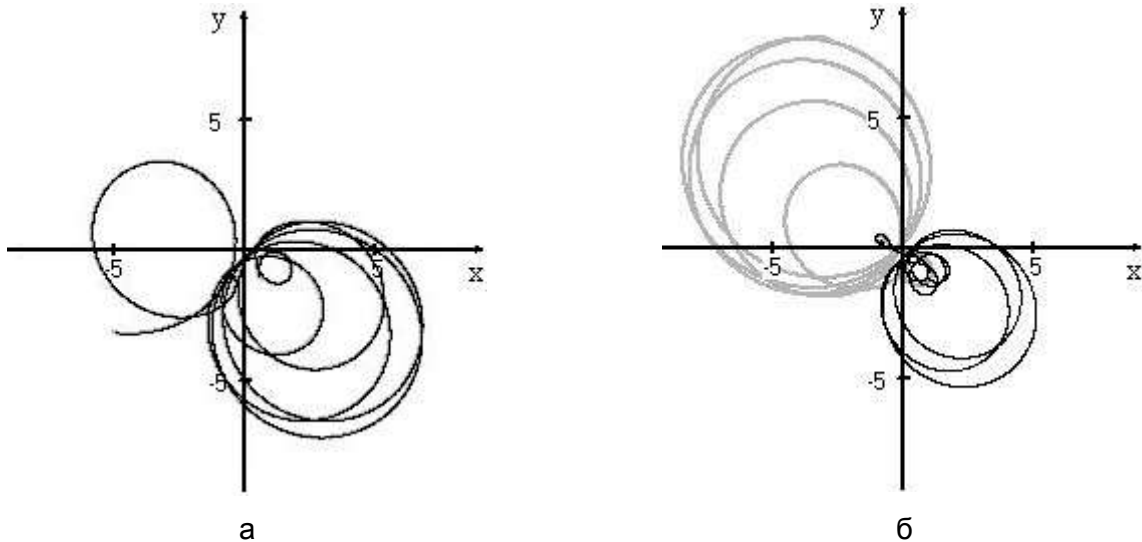


Рис. 1. Траектории движения заряда в магнетронном диоде, электрическое поле вида (3): а – регулярные траектории – $X_0=0,6$, $Y_0=-1$; б – хаотические траектории – $X_0=-0,8$, $Y_0=0,2$

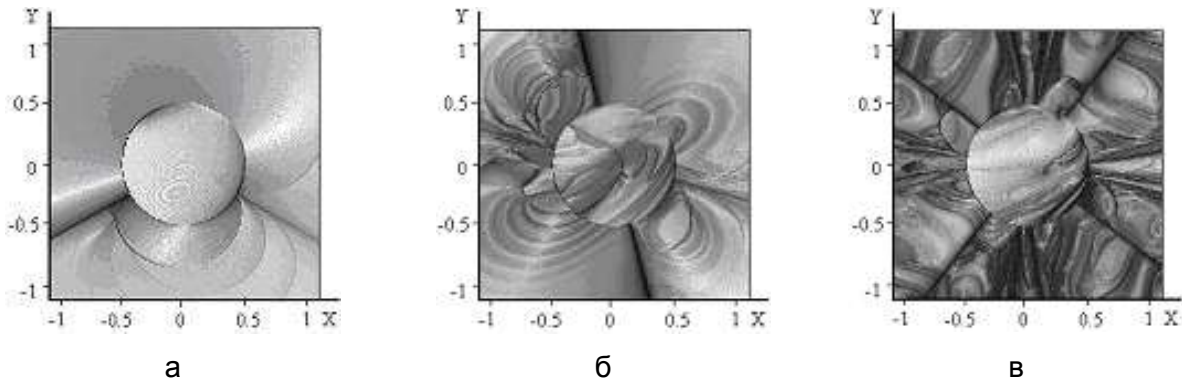


Рис. 2. Карты динамических режимов в плоскости координат (X, Y) : а – электрическое поле (2); б – электрическое поле (3); в – электрическое поле (4)

Как видно из рис. 3, исследуемая область окрашена в светло-серый цвет, показатели Ляпунова отрицательные или близкие к нулю. Вид траекторий и спектра мощности также свидетельствует о том, что заряд движется по типичным регулярным циклоидальным траекториям.

Очевидно, что введенная в зависимость электрического поля меняющаяся по азимуту добавка $\Delta E \sin(\alpha)$ играет дестабилизирующую роль в динамике движения заряда. Более сильное изменение по углу ($\Delta E \sin(2\alpha)$, $\Delta E \sin(4\alpha)$) приводит к появлению большего числа областей хаотичности рассматриваемой системы.

Усиление хаотичности подтверждается и результатами расчёта спектра мощ-

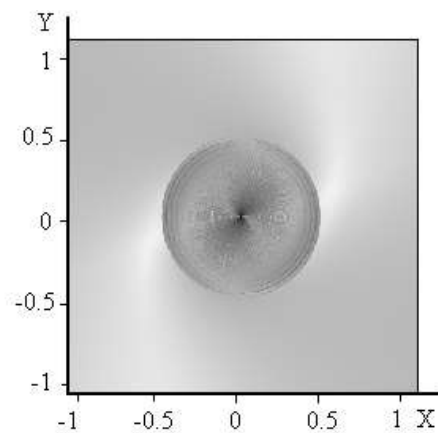


Рис. 3. Карта динамических режимов в плоскости координат (X, Y) : электрическое поле изменяется по радиусу

ности. Так, на рис. 4 представлены спектры мощности, полученные для электрических полей вида (1) и (4). В первом случае (рис. 4, а) спектр имеет регулярный вид, а во втором (рис. 4, б) – спектр содержит значительно больше пиков, его вид характерен для хаотической динамики.

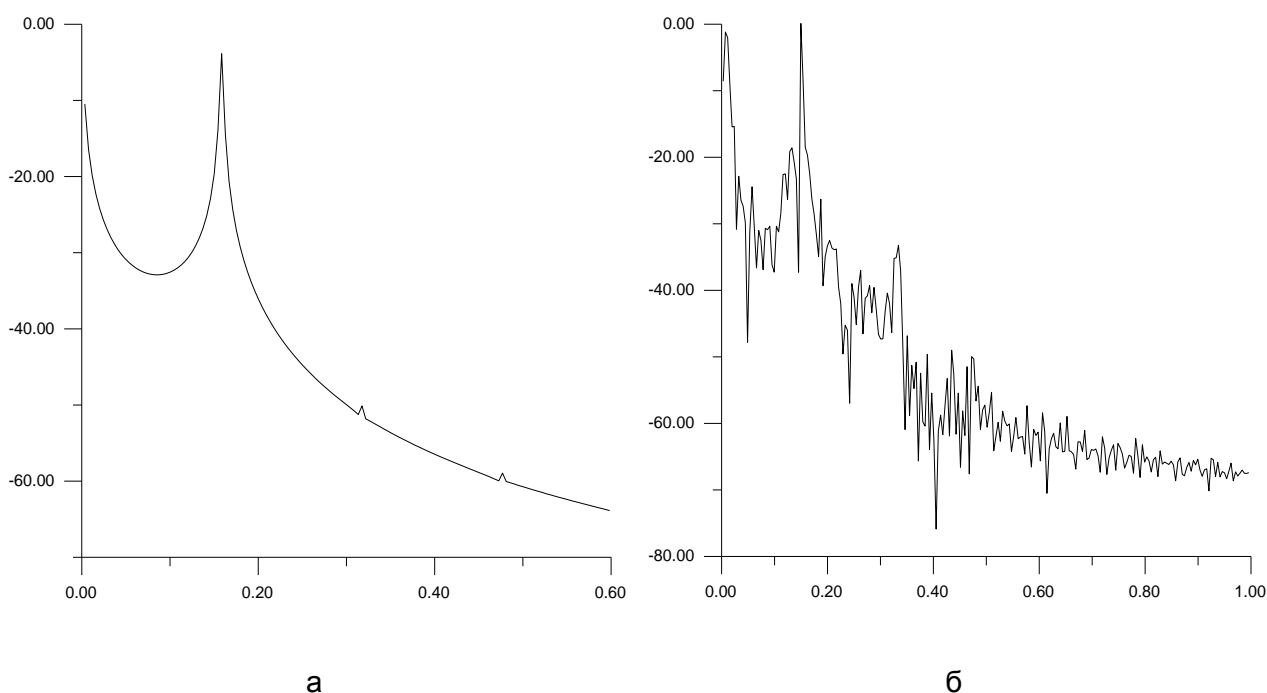


Рис. 4. Вид спектра мощности

Представилось целесообразным рассмотреть динамику движения заряда при сочетании пространственно неоднородного электрического поля (3) и пространственно неоднородного магнитного поля вида:

$$\Omega = \Omega_0 + \Delta\Omega \sin(2\alpha) . \quad (6)$$

Рассчитанные карты динамических режимов представлены на рис. 5.

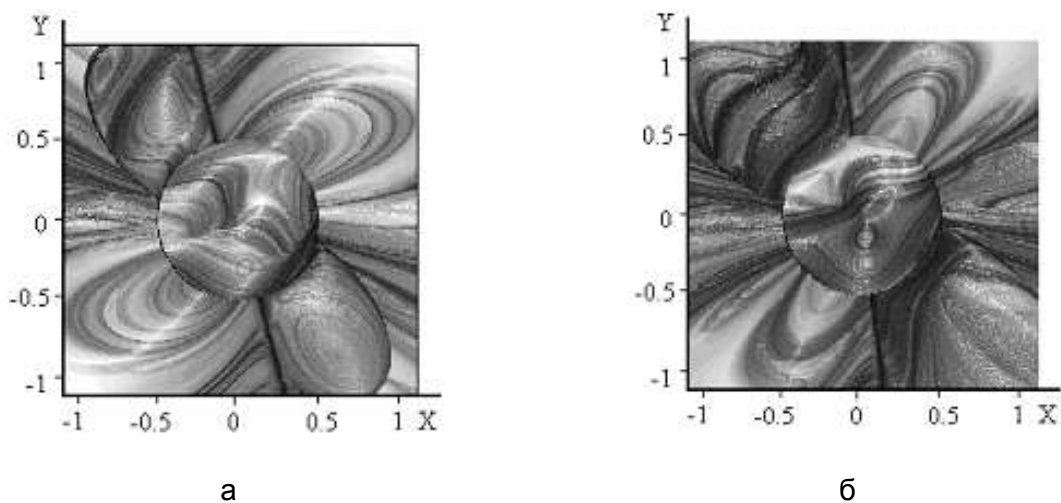


Рис. 5. Карты динамических режимов в плоскости координат (X, Y):
а – $\Omega_0=1, \Delta\Omega=0.6, \Delta E=0.667$; б – $\Omega_0=1, \Delta\Omega=0.6, \Delta E=1.4$

Данные карты были рассчитаны для различных значений параметра ΔE при прочих равных значениях параметров электромагнитных полей и фазовых переменных. Карта на рис. 5, б не содержит (вне области катода) белых регулярных областей. Таким образом, увеличение амплитуды переменного электрического поля, как ожидалось, приводит к усилению хаотичности системы.

В дальнейшем был рассмотрен случай, когда электрическое и магнитное поля изменяются с одинаковой частотой, но в противофазе:

$$E_{x,y} = \frac{U_0}{\ln\left(\frac{r_a}{r_k}\right)\sqrt{x^2 + y^2}} + \Delta E \sin(2\alpha) \quad (7)$$

$$\Omega = \Omega_0 - \Delta\Omega \sin(2\alpha) .$$

Как видно из рис. 6, области нестабильности системы приходятся на области максимального электрического поля, в то время как регулярные светлые области расположены в пространстве слабого электрического поля. При этом сохраняется рассмотренная выше зависимость уменьшения регулярных областей с ростом амплитуды азимутального изменения электрического поля.

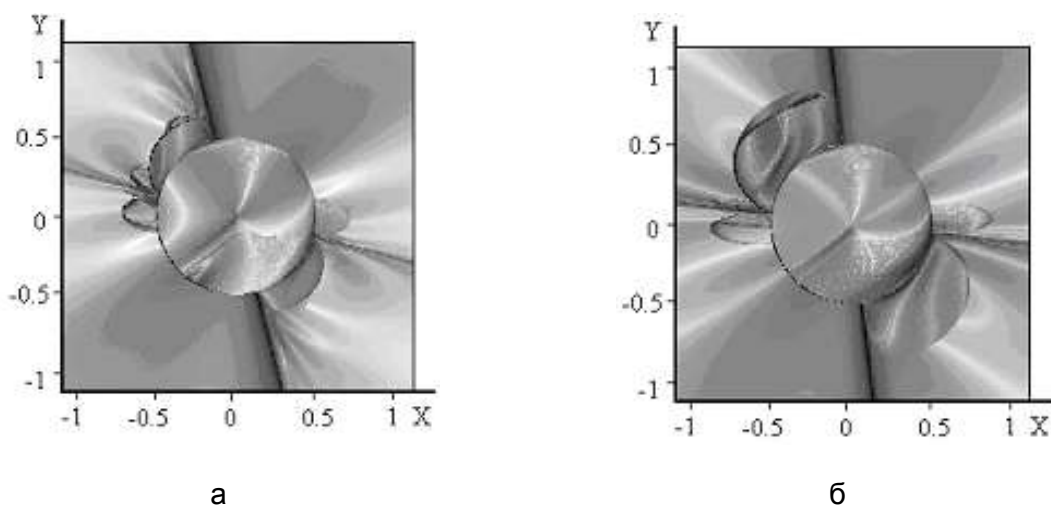


Рис. 6. Карты динамических режимов в плоскости координат (X, Y) : электрическое и магнитное поля изменяются в противофазе
а – $\Omega_0=1, \Delta\Omega=0.6, \Delta E=0.667$; б – $\Omega_0=1, \Delta\Omega=0.6, \Delta E=1.4$

Во всех рассмотренных случаях значения параметров электрического поля задавались таким образом, что значительную роль играла изменяющаяся по углу добавка $\Delta E \sin(\alpha)$.

Примем значение потенциала $U_0=4$ (значение ΔE оставлено без изменений), снизив тем самым влияние на движение заряда азимутально изменяющейся добавки электрического поля.

Полученные при этом результаты (рис. 7) сопоставимы с результатами, которые наблюдались при сочетании радиальной неоднородности электрического поля и магнитного поля, изменяющегося по углу [5]. Области сильной хаотичности системы приходятся на слабое магнитное поле, для сильного магнитного поля характерна регулярная динамика.

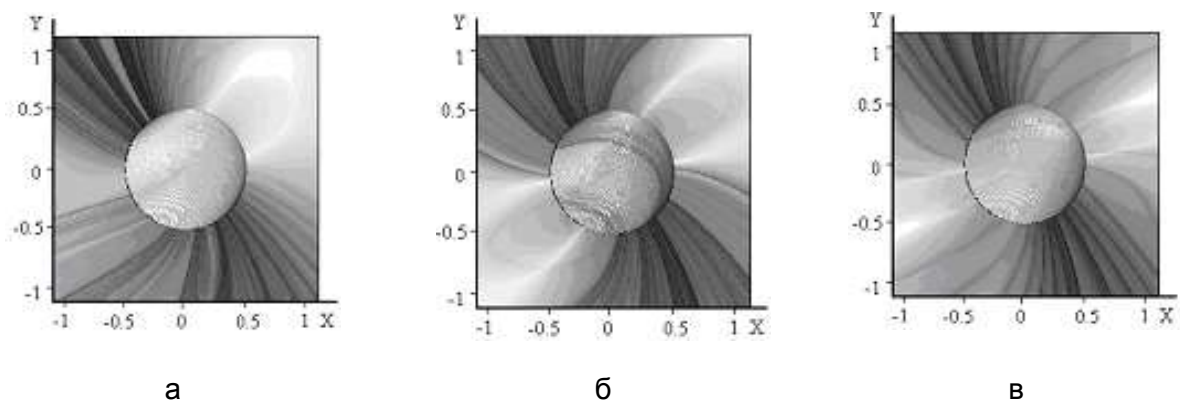


Рис. 7. Карты динамических режимов в плоскости координат (X, Y) :
электрическое поле задаётся как для рис. 1, магнитное поле вида
 $\Omega = \Omega_0 + \Delta\Omega \sin(2\alpha)$, $U_0=4$, $\Delta E=0.667$, $\Delta\Omega=0.6$

В заключение следует отметить: с введением в рассмотрение изменяющегося по углу электрического поля наблюдается появление хаотических режимов в динамике движения заряда в магнетронном диоде; уменьшение периода изменения электрического поля по углу и увеличение амплитуды этого изменения приводит к усилению степени хаотичности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Байбурин В.Б., Мантуров А.О., Юдин А.В. Хаотическое поведение зарядов в скрещенных полях // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2002. Т. 10. № 6. С. 62.
2. Кузнецов С.П. Динамический хаос. М.: Мир, 1988. 240 с.
3. Поттер Д. Вычислительные методы в физике. М.: Мир, 1975. 285 с.
4. Табор М. Хаос и интегрируемость в нелинейной динамике. М.: Эдиториал УРСС, 2001. 318 с.
5. Хороводова Н.Ю., Байбурин В.Б. Исследование хаотичности движения зарядов в магнетронном диоде // Элементы и устройства систем низких и сверхвысоких частот: Межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 2004. С. 67-70.

Байбурин Вил Бариевич –

профессор, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой
«Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем»
Саратовского государственного технического университета

Хороводова Наталия Юрьевна –

аспирантка кафедры
«Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем»
Саратовского государственного технического университета

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 621.798.4 – 426: 65.011.56

В.Я. Подвигалкин

СИСТЕМНЫЕ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВЯЗИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОДУЛЬНОГО ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА ПРОВОЛОКИ

Рассмотрены вопросы построения системы управления в информационно-технологическом модульном производстве стальной проволоки.

V.J. Podvigalkin

SYSTEM INFORMATION-TECHNOLOGICAL TIES OF AUTOMATIZED MODULAR INDUSTRIAL PRODUCTION OF WIRE

Questions of the construction of a system of management in informative-technological modular manufacture of a steel wire are considered in this article.

Работ по созданию перспективных комплексно-автоматизированных технологических процессов сталепроволочного производства на уровне лучших мировых достижений в настоящее время либо нет, либо они не нашли должного понимания. Состояние технологического процесса сталепроволочного производства (рис. 1), где используется преимущественно тяжёлый физический труд рабочего-волочильщика, требует замены мускульного труда на машинный. Использование химического метода подготовки сырья-катанки экологически опасно [1].оборот документов выполняют ручным способом, а не электронным. Труд непривлекателен. Все эти и другие отставания явились причиной перекоса в темпах развития машиностроения, создания радиоэлектронных систем и т.д.

В состав технологического процесса производства проволоки (рис. 1) входят следующие функциональные технологические группы и операции: 1 – химическое удаление окисной окалин с катанки. Техоперация экологически вредная для работающих и вообще для экосистем. В результате очистки катанки образуются сернистые соединения железа и водный раствор с примесями. ВС – функциональная группа технологических элементов волочильного стана: 2а – стан; 2б – хобот-дозатор, на котором осуществляют накопленные примерно веса дозы (≈ 80 кг), откусывание и сброс на стол увязки, формования в моток. ФМ – функциональная группа технологических операций формования в моток рыхлых витков проволоки: 3 – подготовка отрезков вязальной проволоки; 4 – подготовка маркировочной бирки; 5а, 5б, 5с – увязка и уплотнение поочередно в 3 местах, примерно равноудалённых, рыхлых витков проволоки в моток, причём в

месте (зоне) 5с закрепляют маркировочную бирку. 6 – операция откусывания лишней вязальной проволоки (усов). 7 – ручная отгрузка мотка в условный накопитель. 8 – механизированная транспортировка мотков на склад готовой продукции.

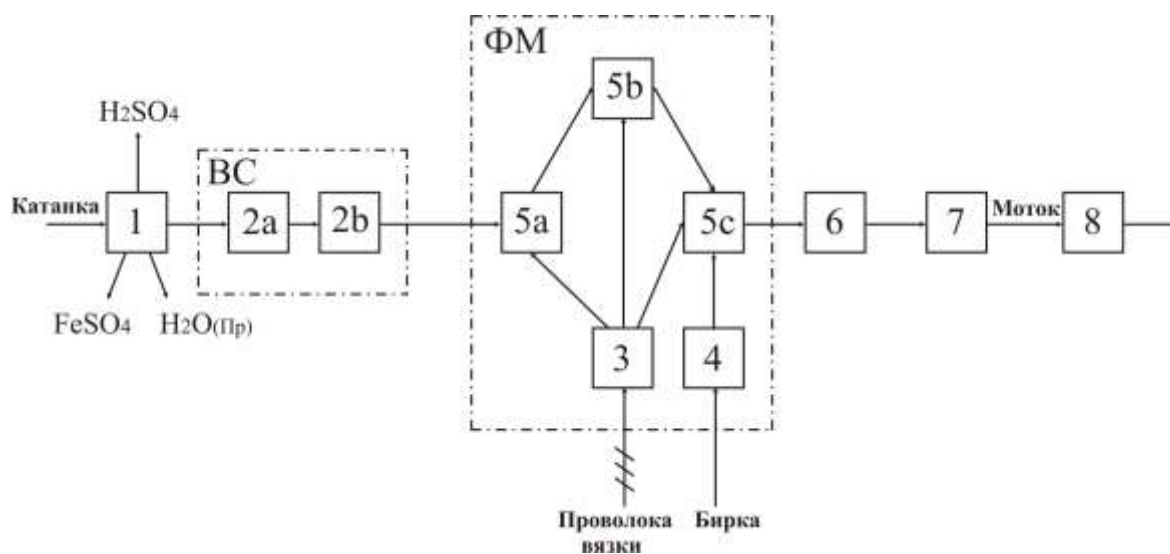


Рис. 1. Функциональная схема технологического процесса производства стальной проволоки

Устранение тяжёлого, экологически опасного, малопроизводительного производства в настоящее время является актуальным.

Производство для России, где достаточно большой объём выпускаемой продукции, когда продукция остаётся постоянной в течение длительного времени, а оборудование не нуждается в частой переналадке, требует применения робота с «жесткой» системой автоматизации. ГПС и ГАП [2,3] нецелесообразны из-за экономических препятствий с одной стороны и применением технически неоправданно сложного оборудования – с другой. Решение задачи механизации и автоматизации за рубежом сводится к созданию вязальных агрегатов, действующих в статике. Об этом свидетельствуют: патент (Япония), № 48-306808, 1973 г.; патент (ФРГ), № 15862875, 1972 г.; патент (США), № 3709422, 1973 г. и многие другие. Некоторые образцы представлены в журнале *Drachtwelt*, 1977, № 9. Все они громоздки и инертны во времени, кроме японских. Эти агрегаты являются дополнительной нагрузкой для рабочего, обслуживающего волочильный стан. Их размещают возле каждого волочильного стана, на выходе последнего блока.

Анализ научно-технических работ [4] показывает, что наиболее удовлетворительно рассмотрена эта задача на примере многономенклатурных производств. На этих производствах, в 70-х – начале 80-х гг. остро встала проблема комплексной автоматизации учёта, планирования и сбыта материалов, комплектующих и готовых изделий. Для этих целей появилась необходимость создания складских автоматических подразделений, где начала возникать идея комплексной автоматизации организации управления экономикой производства.

Единых концептуальных рецептов не было вплоть до 90-х годов XX столетия. В силу же инерции, в стране и в мире возникли рассогласования в экономическом развитии.

Решение задач формирования качественно новой экономики в России возможно на основе принципиальных изменений в производственных отношениях, обновлении форм и методов работы при решительном преодолении инерции, застоя и консерватизма [5]. Представляется целесообразным рассмотрение принципов, организационных и технических решений по преодолению рассогласования путём создания системных информационно-

технологических связей модульного промышленного производства, на примере производства стальной проволоки.

Отличительной особенностью науки нашего времени является разработка новых производственных технологий на основе информационно-технологического и функционального состояния технико-технологического оснащения производств с использованием достижений науки и техники: автоматизации технологического процесса во времени, системности, надежности и т. д. Такой информационно-технологической системой производственного назначения является предлагаемая (рис. 2) информационно-технологическая система управления производством проволоки [6]. Эта система построена по принципу заранее отлаженной замкнутой программы функционирования технологического процесса производства.

Схема системы содержит: пульт управления с автоматической обработкой информации, с возможностью ручного способа контроля и управления; дешифратор – DG; устройство памяти; усилитель команд и сигналов; арифметическое (А) устройство с регистром и преобразователем результатов; устройство управления роботом (СО), исполнительный механизм (М). От датчиков D_1 , D_2 и другого технико-технологического оборудования подаются в систему сигналы готовности и взаимодействия в технологическом цикле. Для нормализации и стабилизации функционального состояния технологически однородного оборудования, которое является тем самым модулем в горизонтальных и вертикальных системных информационных связях, рациональным представляется организация автоматизированной системы управления предприятием по производству проволоки.

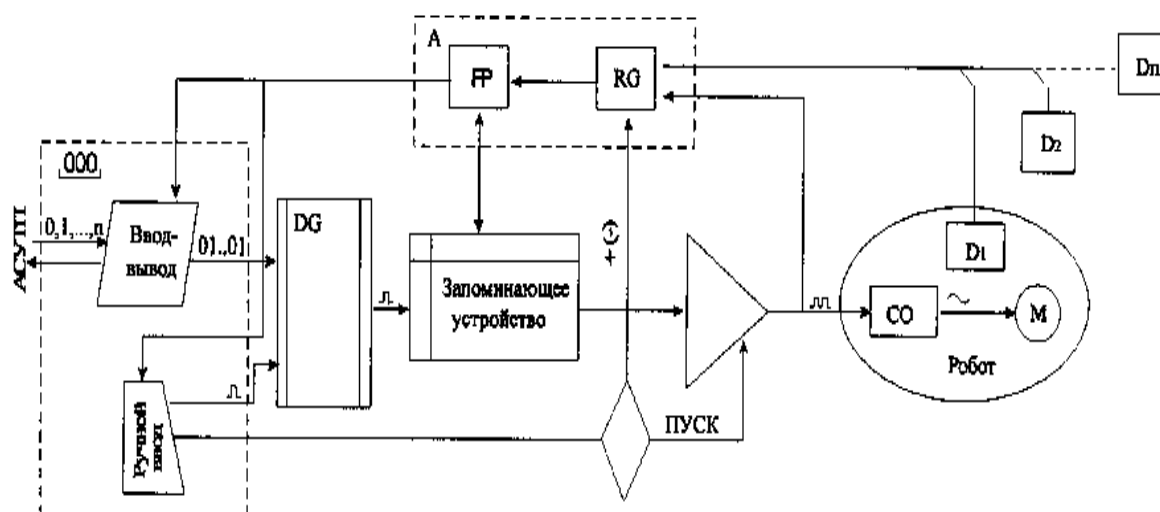


Рис. 2. Электрическая структурная схема информационно-технологической системы управления (ИТСУ)

При разработке информационно-технологической системы производства проволоки опирались на ряд основополагающих теоретических положений математического аппарата алгебры логики [7], импульсной техники [8], достижений микро- [9] и нанотехнологий [10-12]:

1. Производственный модуль состоит из множественных структурно-функциональных элементов, взаимосвязанных в единую многоуровневую сеть, где информационная составляющая каждого отдельного звена влияет как на все остальные элементы (сырье, оборудование и т.д.), так и на все производство в целом.

2. Производство – открытая система, которой свойственны саморегуляция и самоорганизация.

3. Основной структурно-системной организации, функционирования и управления является робот.

4. Элементы, систематизирующие информационные взаимосвязи, существуют во множестве технологического оборудования и системах производства.

5. Взаимодействие внешних иерархических сетей и производства происходит через АСУТП.

6. Восприятие информации осуществляется непосредственно участком производства (пультом управления, роботом, волоочильными станами и остальным технико-технологическим оснащением), а анализирует, организует информационно-обменные процессы АСУТП.

7. Стабильно работающий производственный модуль отличается надежной устойчивостью информационных связей как между горизонтальными функциональными системами производства, так и внутри каждой системы и подсистемы.

8. Показателем устойчивости информационного взаимодействия служит синхронизация собственных технологических процессов, имеющих роботизированную манипуляционную базу.

9. Кодирование информационных потоков состояния производства осуществляется в цифровом представлении.

Рекомендуемая информационно-технологическая система управления содержится в основе проекта «Роботизированный технологический комплекс производства проволоки» и находится в согласии с концепциями Питера Дракера о формировании новых подходов к производству [13].

Поскольку производственные технологические процессы функционируют во времени, целесообразно это далее рассмотреть.

Роботизированный технологический комплекс и время

Основываясь на определении базы измерения затрат на производстве – время, как поддающееся измерению и контролю конкретного технологического процесса, при создании роботизированной системы производства, возникла необходимость в разработке новой системы коммуникации и информации, имеющую современную электронную элементную базу микроэлектроники: микросхемы, микросборки и микроблоки.

Функционирование предприятия всё сложнее, в общей системе обмена информацией, обработке информации, контроля и управления производством в условиях увеличения ритма работы, когда производство – модульная подсистема, рис. 3. Устранение этих сложностей – актуальная задача, решение которой позволит интегрироваться предприятию в обмене информацией о выпускаемой продукции современными методами.

Информация о технологическом состоянии функционального технико-технологического автоматизированного оборудования, учёт и планирование, сбыт результатов производства кодируется в виде прямоугольных импульсов, обозначающих ноль или единицу алгебры Буля [7], рис. 4, а, или же по Бернарду Скляру в виде потока битов в форме двухуровневых импульсов [13], рис. 4, б. На рис. 4 единица означает наличие командного импульсного потенциала для исполнительного операционного технологического механизма, ноль – отсутствие такового.

Сущность работы автоматизированной системы состоит в следующем. Информация от одного из датчиков поступает в арифметическое устройство через переключающее устройство в кодирующее, записывается во временный накопитель – запоминающее устройство (для сравнения) и, одновременно, с регистрирующего пульта управления, поступает в линию связи с АСУ предприятия. В арифметическом устройстве информация распределяется в пульт управления и запоминающее устройство. По каналам обратной связи сигналы поступают в электронный логический оператор для указания направления техпроцесса. От датчи-

ков поступают сигналы уведомления о выполнении команд исполнительными устройствами оборудования в арифметическое устройство.

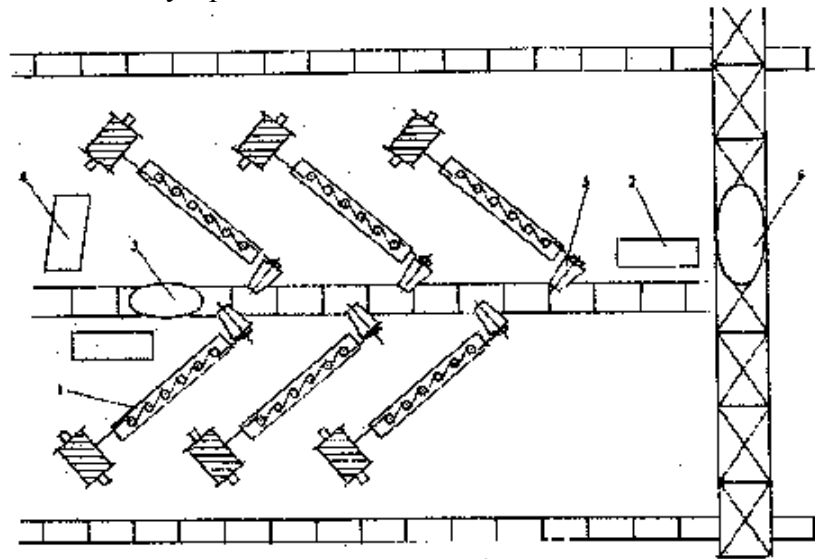


Рис. 3. Схема расположения модульного роботизированного технологического комплекса:
1 – многоблочный волочильный стан; 2 – стеллаж мотков; 3 – робот;
4 – пульт управления технологическим комплексом; 5 – хобот-дозатор; 6 – кран-балка

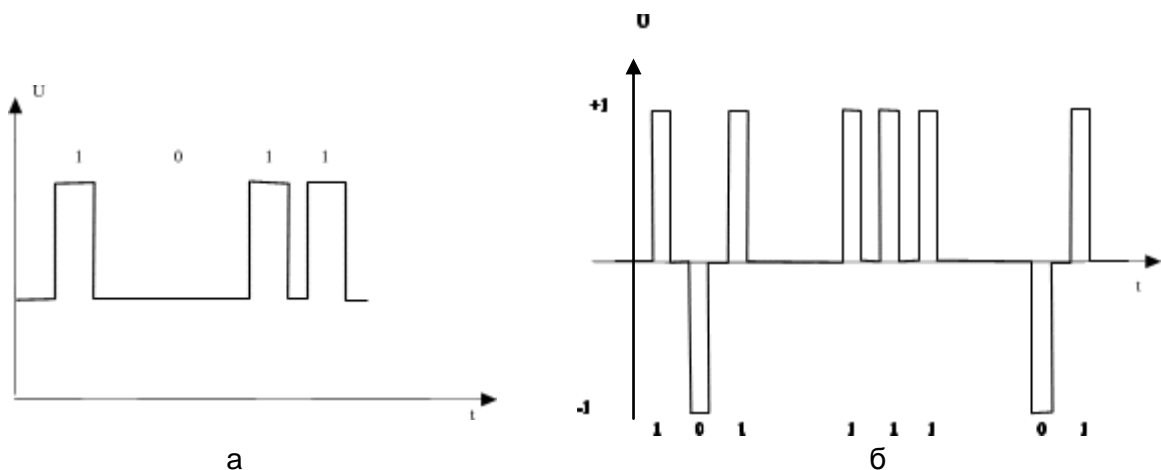


Рис. 4. Импульсное изображение двоичного кода:
а – динамическое кодирование; б – двухуровневое кодирование

Такой метод для данного производства оправдан в силу общности оборудования и жёсткой автоматизации технологического процесса производства. Анализ и сравнение информации возможно проводить не только автоматически, но и оператором пульта управления, который в ручном режиме может корректировать работу ИТСУ модулей $1, 2, \dots, N$. С пульта управления оператор не просто решает задачи, но и управляет (при необходимости) работой робота и всего технико-технологического оборудования. ИТСУ заранее настраивается распределением во времени функций волочильных станков способом последовательных управляющих сигналов, когда все операции определены заранее. Для выполнения сложной последовательности действий используется робот. Робот является ключевым устройством автоматизации всего комплекса технологического процесса, имея сложную систему электромеханических соединений, заканчивающихся рабочими функциональными элементами. Робот устраняет издержки производства, заме-

няя рабочих, значительно повышает производительность труда, вносит свой существенный вклад в обеспечение «гибкости» АСУ предприятия, которая связана с конкретными условиями производства: планирование, составление графика загрузки волоочильного и вспомогательного оборудования, контроль складских запасов и координирования всех производственных вопросов, что представляет особую сложность.

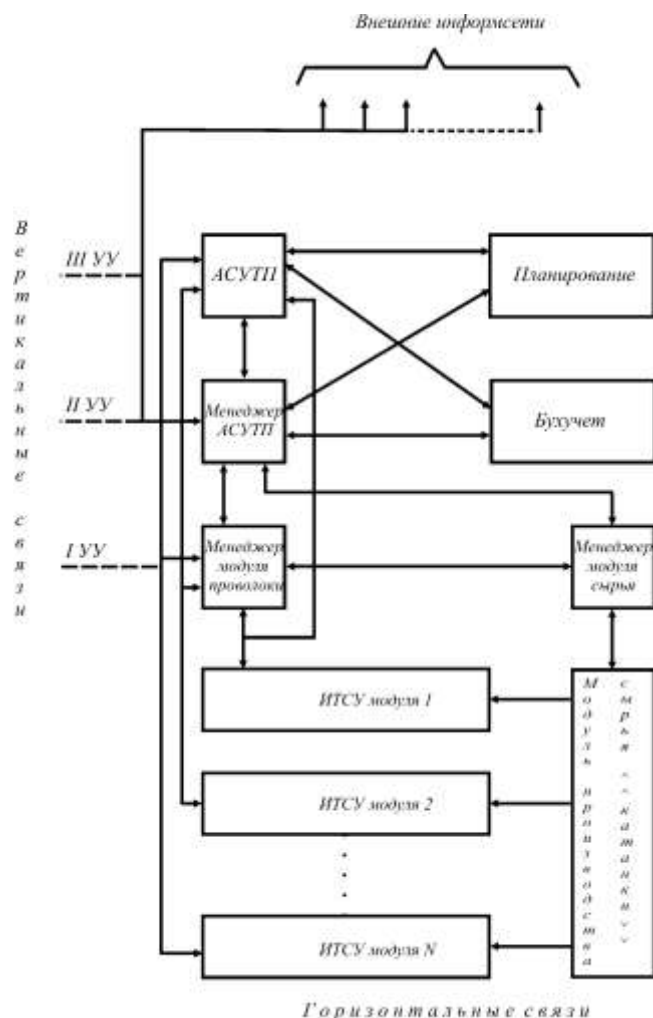


Рис. 5. Структурная схема автоматизированной системы управления предприятием

Иерархическое построение системы управления

Характерной чертой современной экономики является стремление к сокращению наличных запасов сырья, материалов и готовой продукции. Сокращение запасов не должно, однако, снижать надежности снабжения промышленного модульного предприятия сырьем и материалами, а потребителей – готовой продукцией. Задача менеджмента – поддержание оптимальных соотношений между уровнем запасов и надежностью снабжения, опираясь на мобильные информационные сети. Для организации решения подобных задач и предлагается ИТСУ.

Система ИТСУ, разработанная для роботизированного производства, предназначена для оптимального согласования работы по горизонтали, стержнем которой является персональная ЭВМ менеджера. Система способна функционировать параллельно с производством.

Информационные операционные программы (ранее введенные) отражают всю информацию о производственной деятельности, планировании, прогнозировании и т.д.

Автоматизированная система управления предприятием, рис. 5, построена по многоуровневой иерархической схеме: самый нижний уровень (в горизонтали) – управление конкретным производственным участком, где функциональным исполнительным ядром является робот; более высокий уровень – управление автоматизированным модулем (цехом), т.е. комплексом роботизированных участков; высший уровень, – компьютер менеджера, – центр обработки данных, посылающий команды на отгрузку или приём заказов, – это АСУТП. Высший уровень содержит также планирующий сектор и сектор бухгалтерского учёта.

Пульт управления низшего уровня принимает команды с верхнего уровня (от ЭВМ модуля), расшифровывает их с помощью своего запоминающего устройства и выдаёт управляющие сигналы на связанные с ним средства управления роботизированным участком. В одном производственном модуле могут содержаться несколько пультов управления (по числу роботов). Горизонтальные связи непрерывные, после проката катанка сразу подаётся на первый блок волочильного стана, исключая тем самым экологически опасные технологические производственные операции, рис. 1.

Второй уровень управления может накапливать данные, координировать процессы производственных участков модуля, осуществлять учёт, составлять отчёты и выполнять другие связанные с этим задачи.

Третий уровень управления – это мощная единая административная ЭВМ. Сюда стекается в сжатом виде информация от всех пультов управления. Административная ЭВМ обеспечивает руководство модульным производством завода; отчётами всех сторон деятельности, формирует платёжные ведомости, ведёт учёт и отчётность, формирует внутримодульные и заводские распоряжения, счета, составляет планы, а также выполняет функцию центрального хранилища данных для второго уровня. Огромные ёмкости запоминающих устройств позволяют ей хранить отработанные данные, прогнозы и бюджеты с тем, чтобы сравнивать их с текущими значениями, поступающими от отдельных роботизированных участков. Этот уровень имеет выход на внешние информационные сети.

Системный документооборот

Известно, что затратное время на производство и обмен информацией в развитых странах значительно превышает расходуемое время на промышленное производство и обмен материальной продукцией [15]. Во Франции значительное количество фирм специализируются на разработке информационного обеспечения, сборе, обработке и передаче информации на разнообразных видах носителей [16].

Наиболее развивающимися отраслями экономики Японии являются сфера услуг и информатика, где занято 60% трудоспособного населения [17]. С появлением электронных информационных сетей, по которым совершается документооборот, менеджмент во время работы Ли Якокки на фирме Форда коренным образом усовершенствовался [18].

Автоматизированная система управления, рис. 2, предприятия действует в постоянной взаимосвязи с внешними информационными сетями – системами более высокого уровня, наряду с низшими уровнями [19]. Эта взаимосвязь осуществляется посредством электронной информации путём коммуникационной связи.

Технология электронного документооборота в АСУ предприятия преобразует исходную информацию в результативную посредством человеко-машинного информационно-технологического процесса. Передаваемая информация представляет собой, как показано на рис. 4, а и б, двоичные сигналы, образующие определённый числовой код. Информация с помощью электронной почты поставляется одновременно нескольким менеджерам; значительно сокращаются потери времени на телефонные переговоры и другие формы делового общения вследствие возможности направить информацию в виде закодированного электронного сообщения любому числу адресатов по каналам информационных коммуникаций [20].

Основная особенность автоматизированной системы управления предприятия, рис. 5, – совершенствование процесса принятия решений менеджерами всех уровней и повышение эффективности управления. Менеджер же АСУТП обязан с опережением событий извлекать из потока информации стратегические и оперативные установки для нижнего горизонтального уровня управленцев, обеспечивая тем самым «гибкость» всей автоматизированной системы управления технологическим модульным производством.

Надёжность функционирования АСУ предприятия

Иерархический принцип построения сам по себе повышает надёжность работы производственного модуля. Выход из строя какого-нибудь одного звена не означает, что парализована вся система. Остальные звенья по-прежнему управляемы, а порядок размещения готовой продукции находится всегда в пределах досягаемости. Надёжность дополнительно повышается за счёт того, что в запоминающих устройствах верхнего уровня дублируется вся информация о результатах производственного процесса.

На случай выхода из строя какого-либо звена всей АСУ предусмотрена возможность перехода к ручному управлению непосредственно оператором с пульта информационно-технологической системы управления производством проволоки. Кроме того, каждый робот содержит пульт отладки и управления собственной работоспособностью.

Иерархическое разделение функций между ЭВМ значительно упрощает и удешевляет программирование, что также является одним из важных преимуществ иерархического построения АСУ предприятия того или иного производства [7].

Иерархическая АСУ производственными процессами содержит на разных уровнях управления ЭВМ разной мощности: от программируемых управляющих устройств ИТСУ до мощной ЭВМ АСУТП для решения всего круга задач управления и менеджмента.

АСУ предприятия позволит разрешить противоречия производства: между людьми и машинами, временем и деньгами, стандартизацией и гибкостью, функцией и системой в согласии с четырьмя концепциями (принципами) Дракера. Использование такой АСУ позволит сократить потребность в обслуживающем персонале на 75-80%, сила разума заменит мускульную силу рабочего [15].

Структура экономики промышленности будет носить сетевой характер, а не отраслевой посредством информационно-коммуникационных сетей.

Комплексная автоматизация технологического процесса, на примере производства проволоки, в системе управления информационными потоками, показана как реальная возможность организации работ на качественно новом уровне:

1. Создана основа системной организации, функционирования и управления – робот [1,21], функционирующий строго во времени.

2. Множество структурно-функциональных элементов объединены во взаимосвязанную единую многоуровневую сеть, основой которой служит разработанная информационно-технологическая система управления [6].

3. Технологическое состояние автоматизированного оборудования производственного модуля кодируется технически совместимой с высшими информационными сетями цифровой формой представления передачи информации: сбор, фиксация, накопление, обработка посредством общих входных и выходных комплексов, общих кодов, одинаковой организацией памяти и общие программирующие программы.

4. Обеспечиваются стабильность работы модуля и надёжность информационных связей.

Роботизированный информационно-технологический комплекс автоматизированной системы управления выпускаемой продукции будет способствовать более эффективному функционированию сталепроволочного производства без использования в технологии вредных химических операций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Подвигалкин В.Я. Роботизированная система обработки стальной проволоки // Динамика технологических систем: Сб. тр. VII Междунар. науч.-техн. конф. Саратов: СГТУ, 2004. С. 302-304.
2. Гибкое автоматическое производство / Под ред. С.А. Майорова, Г.В. Орловского, С.Н. Халкиопова. Л.: Машиностроение, 1985. 454 с.
3. Соломенцев Ю.М., Сосонкин В.Л. Управление гибкими производственными системами. М.: Машиностроение, 1988. 352 с.
4. Автоматизированный склад в Японии // Организация складского хозяйства, механизация и автоматизация складских работ: Реферативный сборник / ЦНИИТЭИМС. 1971. № 2. С. 1-25.
5. Крашенинников В., Соколов Ф. Управление научно-производственным циклом: содержание, формы, методы // Проблемы теории и практики управления. 1991. № 1. С. 71-72.
6. Подвигалкин В.Я. Информационно-технологическая система управления производством проволоки // Динамика технологических систем: Сб. тр. VII Междунар. науч.-техн. конф. Саратов: СГТУ, 2004. С. 304-306.
7. Кунцман Ж., Наслен П. Булева алгебра и конечные автоматы: Пер. с франц. Е.В. Бабичевой / Под ред. П.П. Пархоменко. М.: Мир, 1969. 232 с.
8. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высшая школа, 1988. 535 с.
9. Исаев Ю.В., Хопяк Е.И. Состояние и тенденции развития толстоплёночных технологий и оборудования: Обзорная инф. ТС-9; Экономика и технология приборостроения / ЦНИИТЭИ приборостроения. М., 1978. 54 с.
10. Нанокompозитные материалы для электроники на основе железа и полиэтиленовой матрицы / Н.М. Ушаков, В.Я. Подвигалкин, И.Д. Кособудский, К.В. Записис // Высокие технологии – путь к прогрессу: Сб. науч. работ. Саратов: Научная книга, 2003. С. 54-58.
11. Новые электропроводящие нанокompозитные материалы для электроники / И.Д. Кособудский, К.В. Записис, Н.М. Ушаков, В.Я. Подвигалкин // Вестник СГТУ. 2003. № 1. С. 108-113.
12. Электрофизические свойства металлополимерных нанокompозитов / К.В. Записис, И.Д. Кособудский, Н.М. Ушаков, В.Я. Подвигалкин // Химия твёрдого тела и современные микро- и нанотехнологии: Материалы III Междунар. конф. Кисловодск, 2003. С. 88.
13. Дракер П. Создание новой теории производства: 2-й Европейский конгресс по управлению // Проблемы теории и практики управления. 1991. № 1. С. 5-10.
14. Скляр Б. Цифровая связь: Теоретические основы и практическое применение. 2-е изд. М. – СПб. – Киев: Вильямс, 2003. 1099 с.
15. Breitenstein R, Die Grosse Hoffnung Lebensgualitat und Erfolgs – hansen in der nachindustrillen Gesellschaft, Dusseldorf – Wien, 1981. S. 93.
16. Франция / Отв. ред. В.Ю. Пресняков, Н.Е. Шулюкин. М.: Междунар. отношения, 1990. 176 с. (Наши деловые партнёры).
17. Сандарьян Ю. Деловая Япония. М.: Мысль, 1991. 252 с.
18. Ли Якокка. Карьера менеджера: Пер. с англ.; При участии У. Новака; Общ. ред. и вступ. сл. С.Ю. Медведкова. М.: Прогресс, 1991. 384 с.
19. Островский В.А. Информатика. М.: Высшая школа, 2000. 511 с.
20. Осипов Ю.К. США – научно-технический лидер? М.: Наука, 1988. 160 с.
21. Подвигалкин В.Я., Антоненко В.А. Устройство для обработки проволоки в мотки после волочения // Бюл. изобр. и откр. 1980. № 10.

Подвигалкин Виталий Яковлевич –
главный специалист лаборатории
Саратовского отделения ИРЭ РАН

ЭКОЛОГИЯ

УДК 620.165.29./088.86/

В.П. Ангелюк

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫХ НОРМ БРАКА ПО ГЕРМЕТИЧНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ КОНСЕРВНОЙ ТАРЫ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ МЯСНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Показано направление в разработке предельно допустимых норм брака по герметичности металлической консервной тары для консервных предприятий мясной промышленности, проведенное в экологических аспектах формирования количественных показателей эффективности их производственных систем.

V.P. Angelyuk

THE ECOLOGICAL ASPECTS OF THE LIMIT PERMISSIBLE STANDARD IN THE WASTER TIGHTNESS OF THE METAL CANNING CONTAINERS IN THE MEAT INDUSTRY

The direction of limit permissible standard in the waster tightness of metal canning containers in the meat industry is proved in the article. That was worked out in accordance with ecological aspects of the forming of effective quantitative changes their production system.

Введенные в Российской Федерации международные стандарты серии 14000 методически обозначили направления оценки экологической эффективности производственных систем промышленных предприятий. Развитие на их основе систем экологического мониторинга консервных предприятий мясной промышленности предполагает разработку научно обоснованных (базовых и перспективных) количественных показателей предельно допустимых норм брака профильной продукции. Это в свою очередь требует совершенствования методических основ построения и аппаратурно-технического оснащения производственных систем консервного производства мясной промышленности, основными экологическими аспектами которого являются сбросы отработанных вод.

Существующие данные исследований по изучению состава сточных вод мясоконсервных предприятий, их специфике и характеру образования позволяют охарактеризовать их как сложную, полидисперсную смесь органической, минеральной и бактериальной природы, для которых необходима многостадийная очистка с локальными звеньями в системы водоотведения [1,2,3]. Следует особо отметить, что концентрация загрязнений в стоках значительно

колеблется в течение смены, суток, времени года. На их величину, а также водопотребление оказывают влияние множество факторов: специализация, структура, мощность, оснащённость предприятия, культура производства, вариабельность, многообразие технологических процессов и т.п. [1]. Местные требования к качеству производственных сточных вод, отводимых в городскую канализацию ряда городов России, различны [2]. Однако содержание жира во всех случаях лимитируется на весьма низком уровне 20-60 мг/л, что обусловлено необходимостью защиты канализационной сети от жировых отложений и городских очистных сооружений от нарушений в работе систем биологической очистки. Доведение сточных вод мясоперерабатывающих производств до норм сброса в природные водоемы (БПК_п – 1-6 мгО₂/л и ХПК – 15-30 мгО₂/л в зависимости от категории водоема) представляет собой главную и серьезную проблему технологической очистки, решение которой осуществляется многостадийно. Применение предварительной очистки с использованием жироловок и флотаторов перед биологической очисткой позволяет снизить содержание жира до остаточных концентраций 25-30 мг/л и нерастворенных органических веществ, приблизительно на 90% (см. рисунок).

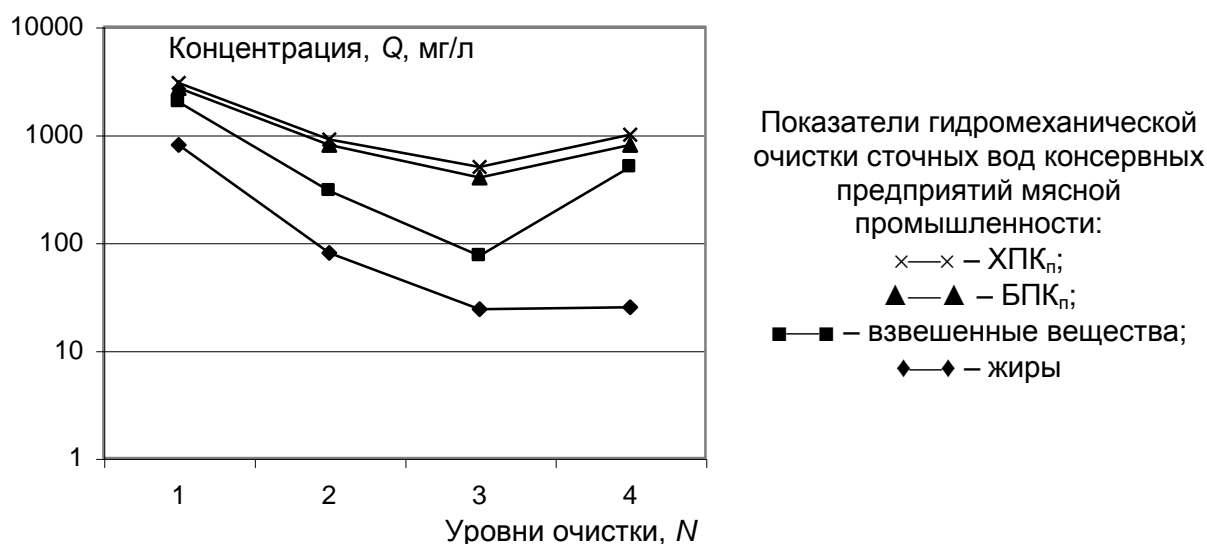


График изменения основных показателей сточных вод мясоконсервных предприятий при их предварительной очистке: 1 – исходный уровень показателей; 2, 3 – уровни очистки, после жироловки и флотатора, соответственно; 4 – нормативный уровень

Это способствует стабилизации условий процессов протекания биологической очистки в случае ритмичной работы системы, но без залповых обвальных сбросов загрязненных стоков предприятиями. Методические основы организации производственной системы мясоконсервного производства объективно допускают нестабильный уровень образования жиродержащих стоков в технологии основного процесса – формирования герметичной тарной упаковки, что позиционирует его с невысоким коэффициентом надежности в экологических аспектах деятельности производственной системы [4]. Так, возможны обвальные, залповые, неконтролируемые сбросы загрязненных вод после процесса стерилизации, с которыми не справляются очистные сооружения. Причиной является нарушение целостности консервной тары в процессе стерилизации, прочность и герметичность в производстве которой, как упаковки продукта, должны являться надежными и контролируруемыми показателями. Это, по большому счету, отсутствует на большинстве предприятий, особенно малых, где контрольным этапом производства выступает сам процесс стерилизации. Технологический вопрос

здесь проработан до уровня «Технических условий» (ТУ) и даже «Государственных стандартов» (ГОСТов) – брак перерабатывается в менее ценную продукцию, утилизируется и т.д., а решения по экологическим аспектам производственных систем в производственной деятельности предприятий представлены второстепенно. По сути дела, можно сказать, что осуществляется нейтрализация совершившегося факта, а не его предотвращение.

Концептуальным подходом в решении существа вопроса обозначен комплекс мероприятий, заключающихся в совершенствовании методической базы контроля герметичности консервной упаковки во всех точках технологического цикла ее формирования как тарной емкости для продукта консервации, а также в аппаратурном оформлении процессов контроля и решения в экономических аспектах деятельности предприятий [5]. Здесь потенциальную значимость решения имеет научно-техническая продукция по совершенствованию аппаратурно-технологических схем консервного производства, с общей направленностью разработок – исключение образования брака консервной тары по герметичности и другим видам технологического брака. Она способна в перспективе занять центральное место в создаваемых экологически эффективных производственных системах консервных предприятий мясной промышленности. Однако отправной точкой в решении вопроса представляются все же мероприятия нормативно-методического плана.

Так, продукция мясоконсервных предприятий учитывается в условных консервных банках. При этом виды брака консервного ассортимента проходят по отчетным бухгалтерским документам в физических банках. Брак до 1% считается технологически допустимым. Его величина обобщенно характеризует устоявшийся уровень организации и культуры производства, но не характеризует экологические аспекты деятельности производственной системы предприятия. Дело в том, что содержание жира в консервах, как наиболее легко вытекаемого, экологически опасного их содержимого, попадающего в сточные воды при потере герметичности тары, различно и зависит от вида консервной продукции и номенклатуры тары. Поэтому процент брака по герметичности консервов, который позиционируется после процесса стерилизации таким образом, неоднозначно характеризует функционирование каждого конкретного предприятия (или предприятий при их сравнении) в аспектах экологической деятельности и влияния на окружающую среду.

В связи с этим, были разработаны предельно допустимые нормы брака (ПДБ) консервов по герметичности [6], где для определения ПДБ было взято за основу «жиродержание» $C_f=3,534$ мг/л условной номенклатурной банки (353,4 мл). При этом допустимое количество условных бракованных банок (N_{Cf}) с учетом предельно допустимой концентрации (ПДК) водоемов сброса равно

$$N_{Cf} = ПДК / C_f. \quad (1)$$

Тогда предельно допустимый сброс (ПДС):

$$ПДС = q_{cm} C_{cm}, \quad (2)$$

где q_{cm} – расход сточной воды; $C_{cm}=(N_{Cf}C_f)$ – концентрация вещества в сточной воде (принимается на уровне концентрации (ПДК), установленном в местах водопользования).

Отсюда число бракованных единиц продукции с нормативным содержанием жира равно:

$$ПДБ = N_{Cf} \cdot C_f / m_f, \quad (3)$$

где m_f – содержание жира в выпускаемом предприятием типоразмере консервной тары соответствующего ассортимента консервов.

Особую значимость приобретает определение ПДБ при организации консервного производства или освоении нового вида продукции. Здесь в целях систематизации видового ассортимента при расчете показателей экологической эффективности предприятий разработана классификация мясных консервов по содержанию в них жира.

А именно, содержание жира в баночных консервах составляет от 3-4% до 10% и более в обеденных, мясорастительных и субпродуктовых («Борщ флотский», «Фасоль, горох или чечевица с мясом», «Каша с мясом», «Мясо с картофелем» и т.п.); около 20% и много выше в натурально-кусковых, паштетных, в зависимости от вида («Мясо тушеное», «Паштет Пражский», «Паштет печеночный» и т.п., в соответствии с ТУ). Достаточно высокий процент жира содержится в новых видах консервов с разнообразными пищевыми добавками [6]. Предлагается, в соответствии с последующими заключениями, классифицировать мясные консервы по содержанию жира на две категории: с содержанием жира до 10% отнести к I категории, выше 10% – ко II категории. При этом в I категории обозначить: а) слабожирные до 5%; б) жирные 5-10%. Такой подход позволит организационно ориентировать производителя на ассортимент выпуска, учитывая природоохранные нормы водоемов пользования.

Для примера, одна номенклатурная банка № 9 массой 338 г натурально-кусковых консервов «Свинина тушеная», отнесенная ко II категории, обнаруженная с активным подтеком после стерилизации на «горячей сортировке», обеспечивает концентрацию жира в отработанных сбросовых водах при одном производственном цикле однокорзиночного аппарата стерилизации, не совместимую с предельно допустимым сбросом (ПДС) в рыбоохранные водоемы. Организация производства при таких «качественных показателях» требует наличия развитых технологий очистки, что не всегда доступно малым предприятиям, расположенным рядом с природоохранными водоемами. Поэтому для таких предприятий необходимо рассмотреть нормы видового производства консервной продукции с пониженным содержанием жира, а также жесткой аттестацией технологии и оборудования вплоть до принципиального вопроса о существовании производства как такового вообще. Для предприятий с комплексной переработкой сырья, с развитой (развивающейся) системой охраны окружающей среды и претендующих на высокий экологический аудит возможно и необходимо технико-технологический пересмотр производственной системы, именно в экологических аспектах ее деятельности. Имея в виду вышепредставленные положения, предлагается следующее.

Расчеты по формулам (1-3) показывают, что выпуск даже «слабожирных» консервов вблизи рыбоохранных водоемов в ходовой сейчас консервной банке № 8 и № 9 не возможен, так как находится на уровне случайного брака (1-2 банки) и превосходит допускаемые нормы сброса. Следует особо обратить внимание, что предлагаемая величина численного значения C_f психологически ориентирует на проблемность консервного производства в близости рыбоохранных водоемов (≤ 3 мг/л) уже на стадии предварительных расчетов при его организации.

При таком подходе в оценке производства следует обратить внимание на фасовку продукта в более мелкую тару (банка № 4, 3, 1), что, вообще говоря, находится в соответствии с социально-психологическим фактором снижения порционной массы упаковки продукта. Здесь «достижение» ПДК происходит при ПДБ в несколько физических банок. Это уже является реальным вариантом, позволяющим разработку практических показателей экологической эффективности производственной системы консервных предприятий, как целевых, так и перспективных.

Достижение целевых показателей экологической эффективности производственной системы консервных предприятий мясной промышленности обосновывается анализом динамической модели производства, построенной по ресурсно-нормативному методу прогноза [7].

Для создания модели ввели следующие обозначения:

D_i – брак по герметичности консервной тары в i -х точках технологического цикла производства при существующем методическом обеспечении; $i=1, \dots, m$;

D_{i0} – объем брака на начало прогноза;

$D_i(t)$ – объем брака в период прогноза $[0, T_0]$;

$\Delta \Lambda_i$ – выбраковка консервной тары по герметичности в i -х точках технологического цикла производства за счет целенаправленных усилий организации;

$\Xi_i = D_i + \Delta \Lambda_i$ – технологическое образование брака консервной тары по герметичности;

$\Delta D_i(t) = \Xi_i'(t)$ – прирост образования технологического брака консервной тары по герметичности (дифференцирование по t);

$A \cdot \Xi^a$ – усилия организации по предотвращению брака консервной тары.

Усилия организации по снижению брака по герметичности консервной тары в анализируемый период времени t представим выражением

$$\sum_{i=1}^m \Xi_i(t) = E(t). \quad (4)$$

Норматив брака (предельно допустимая норма брака) в период прогнозирования $[0, T_0]$ представим в виде

$$\sum_{i=1}^m D_i(T) = (ПДБ), \quad (5)$$

где T – минимальное время процесса, позволяющее достичь норматива брака консервной тары; при этом, в связи с тем, что для периода прогноза T_0 представляет собой результат технологического образования брака, а T получено из предельно допустимых норм брака, оно может не совпадать с T_0 .

Рассмотрим течение процесса при $t + \Delta t$, в результате чего имеем

$$D_i(t + \Delta t) = D_i(t) + \Delta D_i(t)\Delta t + \Delta \Lambda_i(t)\Delta t, \quad (6)$$

на основании чего составим

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{D_i(t + \Delta t) - D_i(t)}{\Delta t} \quad \text{или} \quad \frac{dD_i}{dt} = \Delta D_i(t) - A_i \Xi_i^a \Xi_i(t). \quad (7)$$

Таким образом, учитывая выражения (4)-(7), запишем условия оптимизации математической модели в виде

$$\left. \begin{aligned} T &\rightarrow \min \\ \frac{dD_i}{dt} &= \Delta D_i(t) - A_i \Xi_i^a \Xi_i(t); \\ D_i(t) &\geq \Xi(D_i); \quad i=1, \bar{m}; \\ \sum_{i=1}^m D_i(T) &= (ПДБ); \\ \sum_{i=1}^m \Xi_i(t) &= E(t) \quad \text{– ограничения} \\ \Xi_i(t) &\geq 0, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Здесь $\Xi(D_i)$ – экологически обоснованные нормы основных показателей сбросовых вод мясоконсервного производства региона.

Решение поставленной задачи оптимального быстрогодействия осуществим на основе принципа максимума Понтрягина [8].

Составим функцию Гамильтона

$$H = \sum_1^m \psi_i (\Delta D_i - A_i \Xi_i^a(t) \Xi(t)); \quad (9)$$

$$\frac{d\psi_i}{dt} = 0; \quad i=1, \bar{m}, \quad (10)$$

где ψ_i – сопряженные переменные, при которых условия трансверсальности из выражения (8) для конечных значений переменных равны

$$\Psi_i(T) = -l; \quad i=1, \bar{m}; \quad l \text{ – постоянная}, \quad (11)$$

а сопряженные переменные для модели

$$\Psi_i(t) = -l; \quad i=1, \bar{m}. \quad (12)$$

Составив функцию Лагранжа по выражению (9) с учетом (8)

$$LG = H + v \left(\sum_{i=1}^m \Xi_i(t) - E(t) \right), \quad (13)$$

где v – множитель Лагранжа, соответствующий ограничениям (8), продифференцировав (13) по $\Xi_i(t)$ и приравняв нулю производную, находим усилия организации

$$\Xi_i(t) = \frac{v}{\sqrt[a-1]{\Psi_i a A_i \Xi_i(t)}}. \quad (14)$$

Учитывая (14), из (8) получим выражение для ограничений

$$\sum_{i=1}^m \frac{v}{\sqrt[a-1]{\Psi_i a A_i \Xi_i(t)}} = E(t), \quad (15)$$

откуда найдем множитель Лагранжа

$$v = \left(\frac{E(t)}{\sum_{i=1}^m \frac{1}{\sqrt[a-1]{\Psi_i a A_i \Xi_i(t)}}} \right)^{a-1}. \quad (16)$$

Сделав последовательную подстановку в (8)-(15), получим выражение

$$\Xi_i(t) = \frac{\left(\frac{E(t)}{\sum_{i=1}^m \frac{1}{\sqrt[a-1]{\Psi_i a A_i \Xi_i(t)}}} \right)^{a-1}}{\sqrt[a-1]{\Psi_i a A_i \Xi_i(t)}} \times \frac{1}{\sqrt[a-1]{\Psi_i a A_i \Xi_i(t)}}, \quad (17)$$

при котором и совпадении сопряженных переменных (11) и (12) получим выражение для определения целевых усилий организации

$$\Xi_i(t) = \left(\frac{E(t)}{\sum_{i=1}^m \frac{1}{\sqrt[a-1]{a A_i \Xi_i(t)}}} \right)^{a-1} \frac{1}{\sqrt[a-1]{a A_i \Xi_i(t)}}, \quad i = 1, \bar{m}. \quad (18)$$

Это выражение показывает, что целевые усилия организации в динамике по управлению функционированием производственной системы консервных предприятий мясной промышленности в экологических аспектах их деятельности обеспечивают достижение нормативного уровня брака консервной тары по герметичности за минимальное время в рассматриваемый период.

Основные выводы

1. Сточные воды мясоконсервного производства содержат в своем составе трудноочищаемые жировые составляющие, нейтрализация которых усугубляется спецификой работы производственных систем предприятий мясной промышленности.

2. Предложена градация мясных консервов по содержанию в них жира, позволяющая ориентировать производителя на ассортиментный выпуск продукции в соответствии с территориальными экологическими условиями.

3. Разработано предложение по расчету предельно допустимых норм брака по герметичности мясных консервов при стерилизации на основе содержания в них жира, позволяющее разработать целевые и перспективные показатели экологической эффективности производственных систем консервных предприятий мясной промышленности.

4. На основе анализа динамической модели производственной системы мясоконсервного производства показана принципиальная возможность достижения предельно допустимых норм брака по герметичности мясных консервов целевыми усилиями организации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Большаков О.В. Научное и инженерное обеспечение мясной промышленности (проблемно-системный анализ). М.: Пищевая промышленность, 1998. 368 с.

2. Малахов И.А. Очистка сточных вод мясоперерабатывающих предприятий // Мясная индустрия. 2001. № 5. С. 49-51.

3. Нечаев И.А., Афанасьева О.В. Современные технологии очистки сточных вод мясоперерабатывающих предприятий // Мясная индустрия. 2001. № 8. С. 54-55.

4. Ангелюк В.П., Самсонов В.Н., Скорляков Д.В. Экологические аспекты развития концепции контроля герметичности металлической тары в производстве мясных консервов // Сб. материалов Междунар. науч. чтений «Белые ночи – 2001». СПб.: МАНЕБ, 2001. С. 73-74.

5. Ангелюк В.П. Нейтрализация экологических рисков производственной системы консервного производства предприятий мясной промышленности // Сб. материалов Междунар. науч. чтений «Белые ночи – 2004». СПб.: МАНЕБ, 2004. С. 172-173.

6. Поздняковский В.М. Экспертиза мяса и мясопродуктов. Новосибирск: Изд-во Новосибир. ун-та, 2001. 526 с.

7. Охрана окружающей среды: модели социально-экономического прогноза. М.: Экономика, 1982. 224 с.

8. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1978. 832 с.

Ангелюк Валентин Петрович –

кандидат технических наук, доцент,
докторант кафедры «Машины пищевой промышленности и теплотехника»
Энгельсского технологического института
Саратовского государственного технического университета

УДК 504.064.4

Л.Н. Ольшанская, Е.Н. Лазарева, А.П. Клепиков

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ УТИЛИЗАЦИИ ЛИТИЕВЫХ ХИМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ТОКА

Предложен экономически и экологически обоснованный, доступный способ извлечения лития или его соединений из отработанных литий-

графитовых электродов, являющихся анодами литий-ионных аккумуляторов. Процесс осуществляют путем обработки Li_xC_6 электродов водой (выщелачивание с получением гидроксида лития $LiOH$, 1-я стадия) и последующей обработки образующейся щелочи $LiOH$ в токе углекислого газа (получение карбоната лития Li_2CO_3 , 2-я стадия). Полученные соединения можно использовать в качестве ценных товарных продуктов.

L.N. Olshanskaja, E.N. Lasareva, A.P. Klepikov

ECOLOGICAL ASPECTS OF LITHIUM CHEMICAL CELLS UTILIZATION

This work presents the economically and ecologically proved noncomplex technique of lithium or its compounds extraction from wasted lithium - graphite electrodes used as anodes in lithium ion batteries. The process is carried out by processing Li_xC_6 electrodes (leaching with production of lithium hydroxide $LiOH$, the first step) and further processing of formed alkali in a stream of carbonic acid (production lithium carbonate, the second step). The produced compounds can be used as valuable commodities.

Введение

Анализ влияния литиевых химических источников тока (ЛХИТ) на окружающую среду [1-7] показывает, что по своему вредному воздействию ЛХИТ уступают лишь ртутно-цинковым элементам, свинцовым и никель-кадмиевым аккумуляторам. Влияние ЛХИТ на окружающую среду охарактеризовано величинами предельно допустимой концентрации (ПДК) лития в водоемах и почве. По данным Института санитарии и гигиены им. Сытина АН РФ, ПДК по литию составляет 0,03 мг/л для естественных водоемов и 0,02 мг/м³ в воздухе производственных помещений [1,2]. Целесообразность эксплуатации ЛХИТ определяется суммированием снижения затрат и снижения ущерба от загрязнения. В ряде случаев использование ЛХИТ считается неприемлемым (бытовая техника, игрушки и др.) и ограничивается в основном специальными областями.

В настоящее время проблема утилизации отработанных ЛХИТ выдвинулась в разряд наиболее острых, и в ряде случаев является фактором, сдерживающим увеличение объема выпуска изделий и расширения круга их потребителей. Необходимость утилизации литиевых источников тока обусловлена рядом факторов [1,2,5,7-22]:

- ЛХИТ – высокоэнергетические системы; вследствие высокой объемной плотности энергии они более опасны при вскрытии, чем традиционные системы;
- применяемый в качестве анода литий является высокоактивным, легкоплавким металлом, способным гореть в атмосфере влажного воздуха, активность его в расплавленном состоянии возрастает, при горении лития температура может достигать до 1300°C;
- используемые в ЛХИТ высокоактивные электродные и конструкционные материалы представляют собой сильные окислительные многокомпонентные системы, способные взаимодействовать между собой с выделением энергии взрыва; применяемый в качестве сепарационного материала нетканый полипропилен является горючим материалом и имеет температуру плавления 147°C; электролиты на основе органических растворителей легко воспламеняемы; при нагреве любого электролита выше 290°C происходит его самовоспламенение;
- некоторые вещества, используемые в батареях и электролитах, кроме пожаро- и взрывоопасности обладают еще и токсичными свойствами (табл. 1). В результате их горения образуются соединения в виде газов и аэрозолей, которые также токсичны [1-3,5,8].

Данные о токсичности веществ, применяемых в ЛХИТ [1,18,19]

| Вещество | ПДК, мг/м ³ | Воздействие на организм человека |
|------------------|------------------------|---|
| Литий | 0,03-0,05 | Вызывает ожог при попадании на слизистые оболочки и влажную кожу |
| Диметоксиэтан | 10 | Раздражает слизистые оболочки дыхательных путей, вызывает воспалительные процессы органов дыхания |
| Пропиленкарбонат | 50 | Раздражает слизистые оболочки дыхательных путей, вызывает воспалительные процессы органов дыхания |
| Тионилхлорид ТХ | 0,3 | Обладает раздражающим прижигающим действием при попадании на кожу, слизистую оболочку глаз и верхние дыхательные пути; при высоких концентрациях возможны конъюнктивиты, помутнение роговицы, бронхопневмония и отек легких, рефлекторная остановка дыхания |

Авторами [8] показано, что главным вопросом при утилизации источников тока является сбор отработанных и бракованных ЛХИТ, остающихся на предприятии-изготовителе. Бракованные и отработавшие ресурс источники тока требуют различного подхода к разработке схем их утилизации. В первых – анодный литий практически не израсходован, его нет и в катодном материале. В ЛХИТ второй категории, наоборот, металлический литий и анодный материал претерпели изменения по составу в ходе протекания электрохимических реакций [7-11]. Авторами [1,7-11] предлагается технология разгерметизации ЛХИТ путем механического дробления их с последующим извлечением электролита при незначительном нагреве под разряжением и отгонкой паров апротонных растворителей.

После этого предлагается осуществить отдельную переработку катодного и анодного материалов (рис. 1).

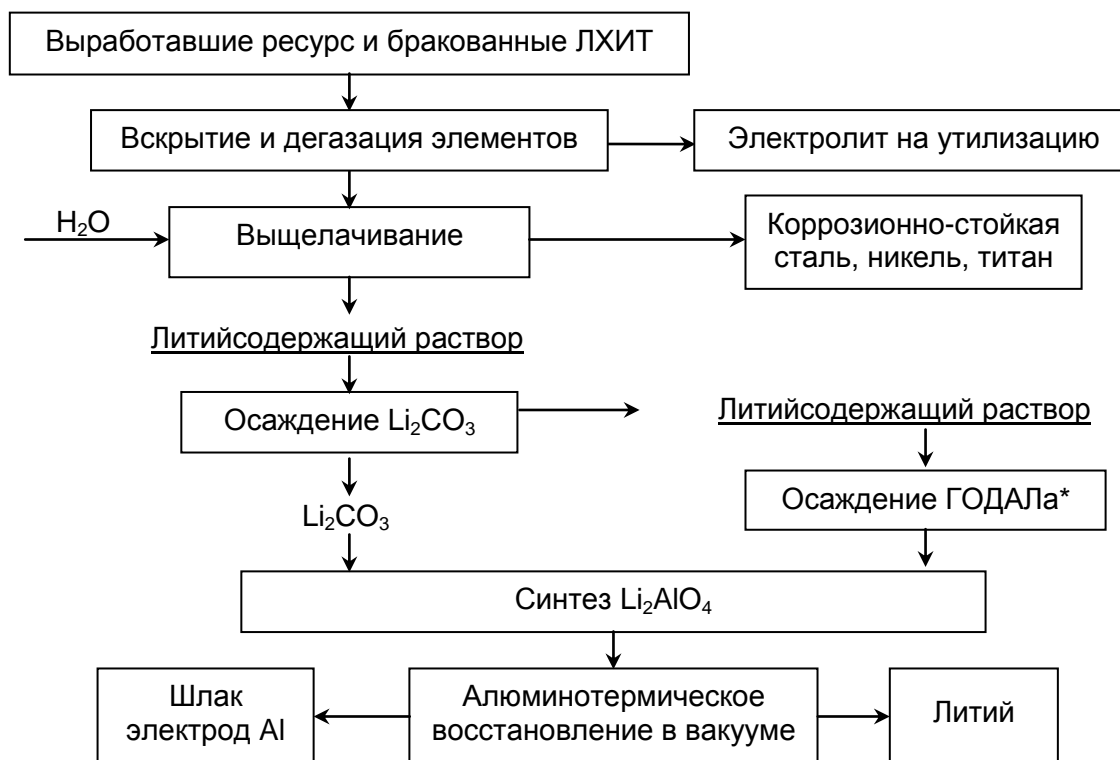


Рис. 1. Технологическая схема утилизации ЛХИТ [7]

Утилизация литийсодержащих отходов

Известно [2,8,9], что до 28% лития, используемого при производстве ЛХИТ, идет в отходы. Вместе с тем литий востребован во многих отраслях народного хозяйства [7-12]: при проведении органического синтеза, электролиза алюминия, в производстве легких сплавов, стекла, керамики, строительных и смазочных материалов, литиевых химических источников тока.

Разработаны научные основы вторичной металлургии лития [5,7], связанные с переработкой литийсодержащих отходов различных производств в карбонат и гидроалюминаты лития, с последующим синтезом алюминатов лития и далее вакуумметрическое получение лития [5,7], удовлетворяющего требованиям ГОСТ (табл. 2). Опытная партия такого металла была использована в производстве ЛХИТ системы Li / MnO₂: результаты положительные [7]. Остатки после восстановления алюмината лития могут быть использованы для корректировки алюминиевых электролизных ванн.

Таблица 2

Сравнительные данные по качеству исходного и вторичного лития [7]

| Литий | Содержание, % | | | | | | | |
|-----------|---------------|-----------|-------------|-------|-------------|------------------|-------|---------|
| | Li | Na | K | Fe | Ca | SiO ₂ | Al | Нитриды |
| ЛЭ-1 | 99,9 | 0,04 | 0,005 | 0,005 | 0,03 | 0,01 | 0,003 | 0,050 |
| ЛЭ-2 | 99,0 | 0,1 | 0,01 | 0,01 | 0,03 | 0,05 | 0,050 | 0,050 |
| Вторичный | 99,7-99,9 | 0,001-0,1 | 0,005-0,001 | 0,007 | не обнаруж. | не обнаруж. | 0,050 | 0,035 |

Показано [12-17], что экономически наиболее целесообразно обезвреживание и регенерацию отходов лития, с превращением их в товарные продукты, проводить на предприятиях – производителях литиевой продукции путем гашения литиевых отходов: в импульсном регулируемом режиме по принципу работы аппарата Киппа, или гашением в водяной суспензии на основе алюмогидратов кальция. Возможно совмещение вариантов. Более короткий цикл получения готовых продуктов возможен при повышенных температурах, в этом случае отсутствует выделение водорода, но возникает опасность самовозгорания отходов после выплавления металла. Извлечение лития из отслуживших источников тока возможно путем перевода активного лития (фольга, порошок электрод) в неактивное состояние при прокаливании под слоем песка [13]; при выщелачивании его в условиях, когда pH конечного раствора превышает 7,7 [14]. Для извлечения лития из растворов с исходной концентрацией лития от 0,03 до 15 г/л используют электролизёры с сильно кислыми ионообменными мембранами на основе сополимеров стирола и дивинилбензола [20]. Предпочтительно использовать катионообменные мембраны с применением перизтиламина с содержанием 3-4 мг-экв активных групп на 1 г полимера. Электролиз проводят при pH=2...6, температуре 5-50°C, плотности тока 100-450 А/м². При этом скорость подачи раствора должна обеспечить требуемый режим в диализаторе. Для обеспечения высокой степени очистки процесс ведут при плотности тока 5-50 А/дм² [21]. Авторами [22-24] разработаны технологии извлечения и последующей утилизации лития из его сплавов с другими металлами путем электрохимического контактирования LiAl отходов с металлом-экстрагентом в солевом расплаве [23], при расплавлении и последующем окислении отходов LiAl различными окислителями (O₂, H₂O₂, Cl₂) [24].

Анализ научно-технической и патентной литературы показывает, что утилизация лития из отходов предполагает использование технологии получения лития из растворов хлорида лития. В этом случае может быть предложена технологическая схема (рис. 2), включающая следующие основные операции [7]:

1. Выделение лития из растворов в виде карбоната и гидроксодиалюмината.
2. Синтез пенталитиевого алюмината.
3. Вакуумметрическое получение лития.

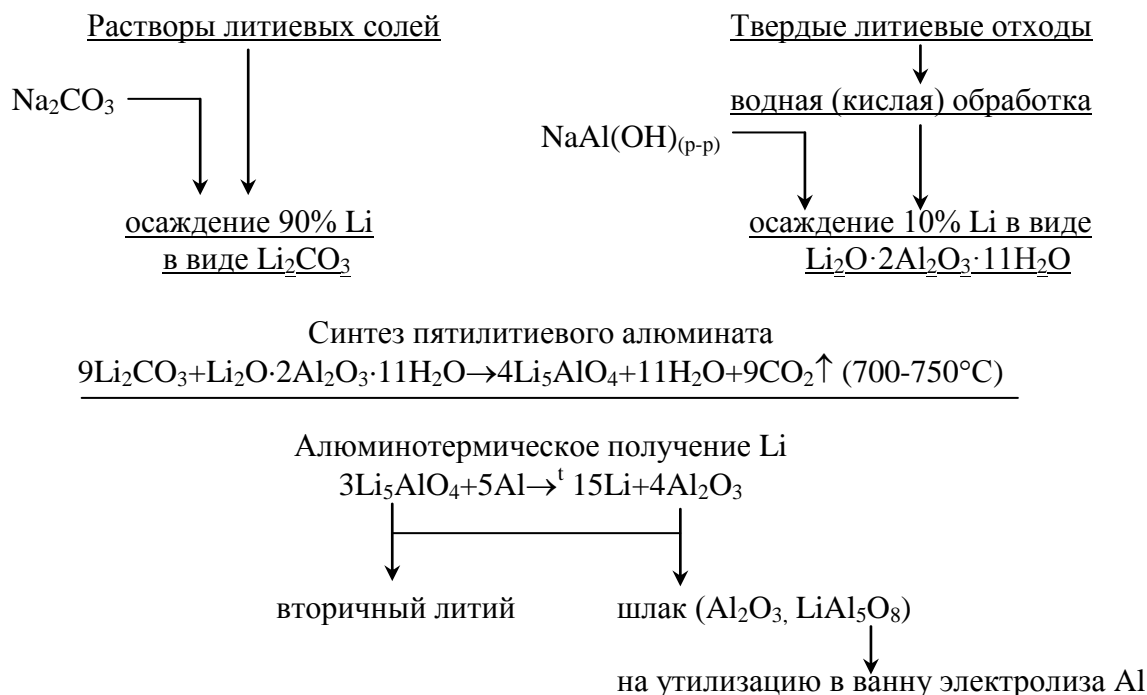
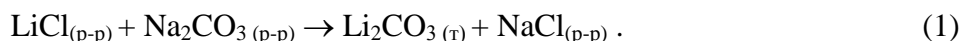


Рис. 2. Технологическая схема получения лития [7]

Если производится обработка отходов в растворе хлористой кислоты (кислая обработка), то осуществляют выделение лития из концентрированных хлоридных растворов путем осаждения в виде Li_2CO_3 :



Карбонат лития значительно меньше растворим, чем карбонаты других щелочных металлов. С повышением температуры растворимость карбоната лития падает, поэтому процесс осаждения целесообразно проводить при температуре 85-90°C (табл. 3).

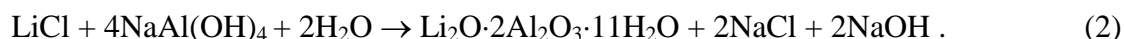
Таблица 3

Растворимость карбоната лития в воде в зависимости от температуры [7,23]

| Температура, °C | 0 | 10 | 20 | 50 | 75 | 100 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Растворимость Li_2CO_3 , % | 1,539 | 1,409 | 1,329 | 1,181 | 0,866 | 0,728 |

В присутствии Na_2CO_3 растворимость карбоната лития еще более снижается. Карбонат лития не образует с Na_2CO_3 двойных или комплексных солей, поэтому последний рекомендуется для осаждения карбоната лития.

Из разбавленных растворов, образующихся после осаждения карбоната, литий может быть выделен в виде гидроксоалюмината (ГОДАЛ $\text{Li}_2\text{O} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$) осаждением раствора алюмината лития с каустическим модулем 2,0-2,5 в соответствии с реакцией:

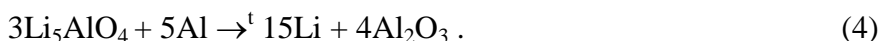


Карбонат лития и ГОДАЛ не могут быть использованы в качестве исходных продуктов для вакуумметрического получения лития, поскольку при нагреве они разлагаются с выделением значительных объемов газообразных продуктов - диоксида углерода и воды. Наиболее пригодны – моноалюминат LiAlO_2 и пятилитиевый алюминат Li_5AlO_4 . При этом использование пятилитиевого алюмината предпочтительнее из-за более высокого содержания лития (27,78 %) по сравнению с моноалюминатом (10,45 %) [7]. Синтез пятилитиевого

алюмината осуществляется спеканием карбоната лития с ГОДАЛом при температуре 700-750°C в течение 2 часов



Далее получают литий алюминотермическим восстановлением в условиях вакуума:



Степень восстановления Li_5AlO_4 более 90% в условиях технологического вакуума (~10 Па) возможна при температурах выше 1000°C. Так, при температуре 1175°C выход лития в течение 4 часов составляет 95-98%. Шлак, образующийся в результате алюминотермического восстановления пятилитиевого алюмината, состоит в основном из оксида алюминия и содержит не более 1,0% лития. Такой шлак выгодно использовать для корректировки электролита алюминиевых ванн.

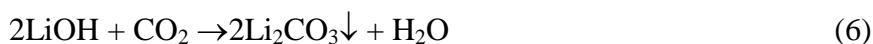
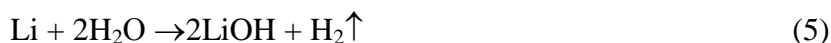
Утилизация литиевых отходов – рентабельный и прибыльный бизнес. Это подтверждают данные по увеличению стоимости лития на мировом рынке от ~ 20\$ до ~ 100\$ за килограмм в течение последних 30 лет [7].

Целью настоящей работы явилось изучение возможности извлечения лития из отработанных литий-графитовых электродов, используемых в качестве анодов в литий-ионных аккумуляторах.

Экспериментальные данные

Анализ приведенной выше литературы показал, что наиболее приемлемым, дешевым и доступным способом извлечения лития или его соединений из отработанных электродов является нейтрализация водой, водно-спиртовыми растворами или слабыми растворами щелочей с последующей обработкой полученной суспензии углекислым газом или карбонатом натрия [7-9].

Нами взята за основу технология обработки отслуживших литий-графитовых электродов из литий-ионных аккумуляторов с помощью воды. Этот выбор обусловлен тем, что если в случае металлического лития процесс протекает с большим экзотермическим эффектом, то при нейтрализации водой Li_xC_6 -электродов этого не наблюдается. Процесс протекает по следующей схеме:



Отработанные Li_xC_6 электроды измельчали и помещали в герметичные сосуды, наполненные бидистиллированной водой в количестве 50 мл. Через 1, 3, 5, 10 и 15 дней, соответственно, их перемещали в сосуды с новой свежей порцией воды. Каждую порцию воды (10 мл), после выдерживания в ней электродов оттитровывали для определения содержания щелочи (LiOH) раствором 0,01 н HCl. Индикатором служил метил-красный. Концентрацию образующейся щелочи определяли по уравнению:

$$N_{\text{LiOH}} = \frac{N_{\text{HCl}} \cdot V_{\text{HCl}}}{V_{\text{LiOH}}} = \frac{0,01 \cdot V_{\text{HCl}}}{10 \text{ мл}} , \quad (7)$$

где V_{HCl} – усредненное по трем параллельным опытам значение объема соляной кислоты, пошедшей на титрование 10 мл раствора щелочи. Затем определяли содержание лития:

$$q_{\text{Li}} = \frac{7 \cdot N_{\text{LiOH}} \cdot 50 \text{ мл}}{1000 \text{ мл}} = \frac{7 \cdot N_{\text{LiOH}}}{20} . \quad (8)$$

Образующийся гидроксид лития на следующем этапе подвергали обработке в токе углекислого газа:



Для синтеза CO_2 применяли аппарат Киппа [26]. Проводили по пять параллельных опытов. Полученные результаты представлены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты титрования бидистиллированной воды после выдержки в ней отходов отработанных Li_xC_6

| Электроды Li_xC_6 (параллельные опыты) | | Объем (мл) 0,01 н HCl, пошедшей на титрование 10 мл воды, после выдерживания в ней электродов в течение (сутки): | | | | |
|---|-------|--|------|------|------|-------------|
| | | 1 | 3 | 5 | 10 | 15 |
| 1 | 32 мг | 0,37 | 0,24 | 0,09 | 0,03 | не обнаруж. |
| 2 | 35 мг | 0,47 | 0,25 | 0,11 | 0,05 | не обнаруж. |
| 3 | 43 мг | 0,46 | 0,27 | 0,13 | 0,05 | не обнаруж. |
| 4 | 37 мг | 0,43 | 0,25 | 0,11 | 0,04 | не обнаруж. |
| 5 | 47 мг | 0,44 | 0,26 | 0,12 | 0,05 | не обнаруж. |
| Среднее 39 мг | | | | | | |

По истечении 10 суток остаточное содержание лития в составе отработанной электродной массы было незначительно и не превышало погрешности измерения.

Результаты определения содержания лития в исследуемых растворах представлены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты выщелачивания лития водой из Li_xC_6 отходов

| Электро- ды Li_xC_6 | Количество лития, выщелачиваемого водой в течение (сутки): | | | | | | | | | |
|---|--|--------------------------------------|--|--------------------------------------|--|--------------------------------------|--|--------------------------------------|--|--------------------------------------|
| | 1 | | 2 (3) | | 2 (5) | | 5 (10) | | Общее | |
| | $N_{\text{LiOH}} \cdot 10^4, \text{H}$ | $q_{\text{Li}} \cdot 10^4, \text{г}$ | $N_{\text{LiOH}} \cdot 10^4, \text{H}$ | $q_{\text{Li}} \cdot 10^4, \text{г}$ | $N_{\text{LiOH}} \cdot 10^4, \text{H}$ | $q_{\text{Li}} \cdot 10^4, \text{г}$ | $N_{\text{LiOH}} \cdot 10^4, \text{H}$ | $q_{\text{Li}} \cdot 10^4, \text{г}$ | $N_{\text{LiOH}} \cdot 10^4, \text{H}$ | $q_{\text{Li}} \cdot 10^4, \text{г}$ |
| 1 | 3,70 | 1,30 | 2,40 | 0,84 | 0,90 | 0,32 | 0,30 | 0,11 | 7,3 | 2,57 |
| 2 | 4,20 | 1,47 | 2,50 | 0,88 | 1,10 | 0,39 | 0,50 | 0,18 | 8,3 | 2,92 |
| 3 | 4,60 | 1,61 | 2,70 | 0,95 | 1,30 | 0,46 | 0,50 | 0,18 | 9,1 | 3,20 |
| 4 | 4,30 | 1,51 | 2,50 | 0,88 | 1,10 | 0,39 | 0,40 | 0,14 | 8,3 | 2,92 |
| 5 | 4,40 | 1,54 | 2,60 | 0,91 | 1,20 | 0,42 | 0,50 | 0,18 | 8,7 | 3,05 |
| Среднее 39 мг | 4,24 | 1,49 | 2,54 | 0,89 | 1,12 | 0,40 | 0,44 | 0,16 | 8,34 | 2,95 |

Проведенные нами исследования показали, что количество извлеченного лития при средней навеске активной массы электродов 39 мг и среднего общего количества извлеченного лития с одного электрода $q_{\text{Li}} = 2,95 \cdot 10^{-4}$ г ($2,95 \cdot 10^{-1}$ мг) составляет $\sim 7,6$ г на 1 кг отходов Li_xC_6 . Если учесть, что ПДК по литию составляет $\sim 0,03$ мг/м³ (вода) и $0,02$ мг/м³ (воздух), то при утилизации только 1 кг отслуживших Li_xC_6 -электродов незагрязненными окажутся $250 \dots 400$ м³ воздуха или $250000 \dots 400000$ л воды. Несложный расчет показывает, что из 2 кг отходов Li_xC_6 можно получить $\sim 1,0$ кг товарного гидроксида LiOH или $\sim 1,5$ кг товарного карбоната Li_2CO_3 , которые востребованы в народном хозяйстве. Остаток после выщелачивания, содержащий, в основном, саже-графитовую композицию с ингредиентами связующего – фторопласта, можно использовать в качестве добавки в битумно-асфальтовые композиции или в технологии производства резинотехнических изделий.

Таким образом, мировой опыт промышленного производства ЛХИТ показывает, что вопросы утилизации целесообразно решать уже на стадии разработки изделий. Это позволит принимать конструктивные и технологические решения, позволяющие наиболее эффективно перерабатывать изделия после завершения их жизненного цикла. Проблема накопления выработавших свой ресурс ЛХИТ требует кардинального решения, так как отсутствие технологической утилизации является сдерживающим фактором широкого применения данных изделий. Основные направления решения экологических проблем литиевых химических источников тока связаны с обезвреживанием реакторной части отработавших свой ресурс ЛХИТ (литий и его соединения, раствор электролита, катодные материалы) с извлечением и последующей утилизацией (вторичным использованием) полезных компонентов.

Нами установлено, что экономически и экологически целесообразно утилизацию лития из отработанных литий-графитовых электродов проводить путем выщелачивания водой с получением товарных продуктов – щелочи LiOH или карбоната Li_2CO_3 . На последующих этапах можно синтезировать пятилитиевый алюминат и затем вакуумметрически получать металлический литий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Миклушевский В.В. Утилизация литиевых химических источников тока // Экология и промышленность России. 2002. № 12. С. 24-26.
2. Сергеев А.Г. Влияние литиевых источников тока на окружающую среду в сравнении с другими распространенными источниками тока // Тез. докл. II совещ. по литиевым источникам тока. Саратов, 1992. С. 143.
3. Harpen P.W., Edwards J.H. The global lithium Industry – A portrait of rapid flux // JOM. 1997. Vol. 49, № 6. P. 781-786.
4. Литий России: состояние, перспективы освоения и развития минерально-сырьевой базы / Т.П. Линде, О.Д. Ставров, Н.А. Юшко и др. // Минеральное сырье. 2000. № 6. С. 664-668.
5. Миклушевский В.В., Ватулина И.И. Установка для вакуумметрического получения лития из продуктов переработки литийсодержащих отходов // Экология и промышленность России. 2002. № 3. С. 36-38.
6. Alexander J.H. Lithium Supply exceeds demand // Eng. And Mining. I. 2000. Vol. 182, № 3. P. 317-321.
7. Миклушевский В.В., Ватулин И.И. Технология переработки литиевых отходов // Экология и промышленность России. 2003. № 1. С. 23-25.
8. Кулифеев В.К., Тарасов В.П., Миклушевский В.В. Научные основы технологии утилизации отработанных и бракованных ЛХИТ с неводным электролитом // Тез. докл. IV Междунар. конф. по энергетике. М., 1996. С. 136.
9. Утилизация отработанных ЛХИТ и отходов их производства / В.К. Кулифеев, В.В. Миклушевский, С.В. Спасенников, В.П. Тарасов // Тез. докл. III совещ. стран СНГ по ЛИТ. Екатеринбург, 1994. С. 88.
10. Переработка и вторичное использование материалов реакторной части литиевых источников системы $(\text{CF})_x\text{-Li}$ / Е.И. Бондарь, В.Н. Плахотник, И.Л. Гуливец и др. // Тез. докл. II Всес. совещ. по литиевым источникам тока. Саратов, 1992. С. 136.
11. Обезвреживание и утилизация реакторной части литиевых батарей системы Li/LiBF₄,γ-БЛ/(CF)_x / В.Н. Плахотник, Е.И. Бондарь, И.Л. Гуливец и др. // Тез. докл. III совещ. стран СНГ по ЛИТ. Екатеринбург, 1994. С. 87.
12. Утилизация литиевых отходов / В.А. Беляев, А.Н. Евстигнеев, В.А. Низов, Н.П. Попыхов // Тез. докл. II совещ. по литиевым источникам тока. Саратов, 1992. С. 135.
13. Невская И.В., Шордин С.Д., Нахшин М.Ю. Безопасный способ уничтожения отходов лития и его сплавов // Литиевые источники тока: Тез. докл. I Всесоюз. совещ. Новочеркасск, 1990. С. 134.

14. Kunugita E., Kim I.H., Kamasawa I. Процесс извлечения лития из отработанных литиевых батарей // Кагаку когаку робибунсю. 1989. Т.15. Р. 857-862.

15. Обезвреживание и переработка литиевых батарей электрохимической системы Li / LiBF₄ / В.Н. Плахотник, Д.Т. Мэрши, В.П. Фролов и др. // Конверсия и экология: Материалы Междунар. конф. Днепропетровск, 1999. С. 86-88.

16. Экологические аспекты утилизации литиевых батарей системы ФУЛ / В.Н. Плахотник, И.М. Игдаков, В.Л. Фролов и др. // Фундаментальные проблемы преобразования энергии в литиевых электрохимических системах: Материалы VII Междунар. конф. Саратов, 2002. С. 134-135.

17. Проблемы экологии при производстве и обезвреживании литиевых элементов / В.Н. Плахотник, И.М. Игдаков, В.Л. Фролов и др. // Фундаментальные проблемы электрохимической энергетики: Материалы IV Междунар. конф. Саратов, 1999. С. 81-82.

18. Вредные вещества в промышленности: Справочник / Под ред. Н.В. Лазарева и Э.Н. Левиной: В 3 т. Т. I. Органические вещества. 7-е изд., перераб. и доп. Л.: Химия, 1976. 592 с.

19. Вредные вещества в промышленности: Справочник / Под ред. Н.В. Лазарева и Э.Н. Левиной: В 3 т. Т. III. Элементоорганические соединения. 7-е изд., перераб. и доп. Л.: Химия, 1976. 624 с.

20. Пат. 4636295 США, МКИ⁵ С 25 В 1/16. НКИ 204/182.4. Method for the recovergu of lithium from golutions by electro dialisics / В.Л. Ball, Д.А. Vacteng // РЖ Химия. 1987. № 22. С. 19.

21. А.с. 939399 СССР. МКИ⁵ С 02 F 1/46. Способ очистки сточной воды от лития, цинка, хрома / В.Н. Голубев, Б.А. Пурин, В.П. Суэтин, Н.Т. Ванага, К.М. Дюмаев, Е.В. Загорина, Э.Н. Шлома. – № 2781882/ 23 26; Заявлено 19.06.79; опубл. в БИ, 1982. № 24.

22. Пат. 2016140 Россия, МКИ⁵ С 25 С 3/02. Способ извлечения лития из отходов алюминиево-литиевых сплавов / А.А. Леонов, В.Н. Лебедев, В.И. Сальников. – № 5017988/02; Заявлено 23.01.91; Опубл. 15.07.94 // РЖ Электротехнология. 1995. № 17. С. 17.

23. Пат. 4973390 США, МКИ⁵ Н 01 М С 25 С 3/02. Process and apparates for producing lithium from aluminium-lithium alloy scrap in a three-layered lithium transport all / Roy A. Christini, Eric Z. Clark, Polert D. Cirt; aluminium Co of America. № 217764. Заявлено 11.07.88; Опубл. 27.11.90.

24. Wilson W.R., Allen D.I. Aluminium-lithium acrospase alloys. A new chellange for recreation // Mater. conf. Berminghem, London, 1990. P. 311-315.

25. Справочник химика: В 6 т. Т.2. Неорганические соединения. Органические соединения. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Химия, 1966. 1168 с.

26. Рачинский Ф.Ю., Рачинский Ф.Ю., Рачинская М.Ф. Техника лабораторных работ. Л.: Химия, 1982. 432 с.

Ольшанская Любовь Николаевна –

доктор химических наук, профессор,
заведующая кафедрой «Экология и охрана окружающей среды»
Энгельсского технологического института
Саратовского государственного технического университета

Лазарева Елена Николаевна –

кандидат химических наук, ассистент кафедры «Экология и охрана окружающей среды»
Энгельсского технологического института
Саратовского государственного технического университета

Клепиков Андрей Павлович –

аспирант кафедры «Технология электрохимических производств»
Энгельсского технологического института
Саратовского государственного технического университета

Б.Н. Яковлев

МОДЕЛИ ИЗМЕНЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИЙ ПАРОГАЗОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ ГОРЮЧИХ ВЕЩЕСТВ В ВОЗДУШНЫХ ЗОНАХ КАНАЛИЗАЦИОННЫХ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТОЧЕК ИХ ЗАМЕРОВ

Исследованы концентрации парогазовоздушных смесей горючих веществ в воздушных зонах канализационных очистных сооружений. Получены аналитические модели зависимостей изменения значений концентраций от мест и точек их замеров внутри и снаружи очистных сооружений производственной канализации.

B.N. Yakovlev

MODELS OF THE CONCENTRATION CHANGE OF VAPOR-GAS-AIR MIXTURES OF COMBUSTIBLE MATERIALS IN AIR ZONES OF SEWAGE PURIFYING CONSTRUCTIONS DEPENDING ON THE POINTS OF THE TAKEN MEASUREMENTS

The article shows the studies in the sphere of vapor-gas-air mixtures of combustible materials in air zones of sewage purifying constructions. The analytical models were received depending on the variations of the concentration numbers and from places and points the measurements have been taken inside or outside of purifying constructions of industrial sewage systems.

Для разработки инженерных мероприятий по уменьшению загрязнения воздушной среды, снижения пожаровзрывоопасности канализационных очистных сооружений необходимо определить максимальные значения концентраций парогазовоздушных смесей (ПГВС) в их различных зонах. Важным является также исследование основных факторов, влияющих на концентрации ПГВС в воздушных зонах исследуемых сооружений, выявления закономерностей распространения паров и газов внутри и снаружи сооружений.

В очистные канализационные сооружения предприятий и производств, применяющих легковоспламеняющиеся и горючие жидкости (ЛВЖ и ГЖ) постоянно в различных количествах поступают горючие вещества. В процессе испарения, а также химико-биологических реакций производственные сточные воды выделяют опасные и вредные пары и газы, в связи с чем канализационные очистные сооружения могут быть источником взрывов, пожаров, загрязнения окружающей среды, отравления работающих и населения, проживающего вблизи данных сооружений.

Для определения реальной картины загазованности воздушной среды внутри и снаружи канализационных очистных сооружений проведены долговременные натурные исследования на действующих очистных сооружениях ряда предприятий и производств основных отраслей промышленности. В результате получены максимальные значения концентраций ПГВС в различных зонах очистных сооружений [1]. После соответствующей обработки [2, 3] получены математические модели зависимостей изменения значений концентраций от точек их замеров. Ниже приведены сами модели в графическом (рис. 1-7) и аналитическом (1)-(38) виде.

Аналитический вид зависимостей, изображенных на рис. 1:

$$C_{\text{г}}^{1.м} = 0,654184 \cdot H_{\text{в}}^3 - 0,45383 \cdot H_{\text{в}}^2 - 2,1956 \cdot H_{\text{в}} + 12,101 ; \quad (1)$$

$$C_{\text{г}}^{2.м} = 0,31927 \cdot H_{\text{в}}^3 - 0,84212 \cdot H_{\text{в}}^2 - 4,2151 \cdot H_{\text{в}} + 9,1937 ; \quad (2)$$

$$C_{\text{г}}^{3.м} = -0,96308 \cdot H_{\text{в}}^3 - 2,032 \cdot H_{\text{в}}^2 - 1,751 \cdot H_{\text{в}} + 4,081 . \quad (3)$$

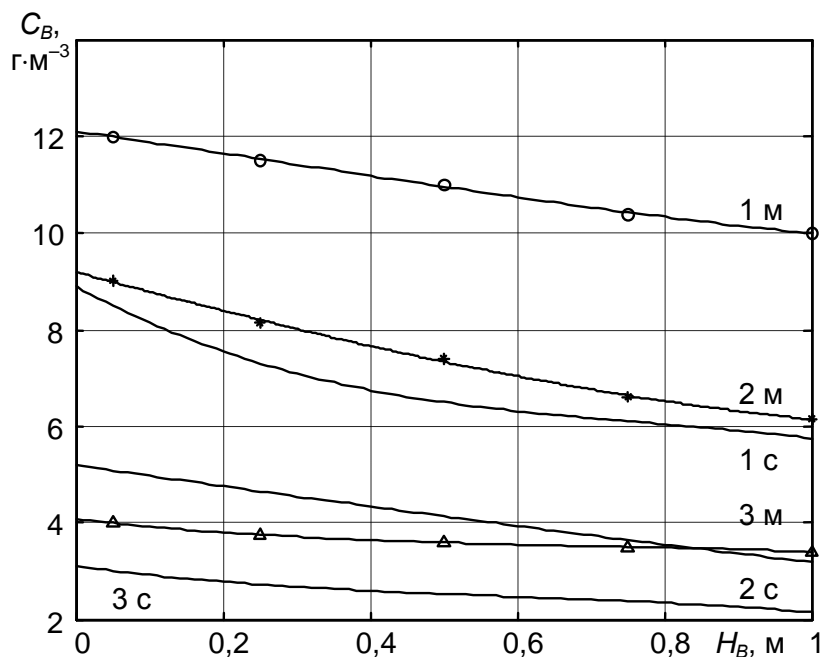


Рис. 1. Зависимости изменения концентрации ПГВС (C_B) внутри очистных сооружений по высоте воздушной зоны (H_B). 1 м, 2 м, 3 м и 1 с, 2 с и 3 с – соответственно максимальные и средние значения концентраций: 1 – в начале; 2 – в середине; 3 – в конце очистных сооружений

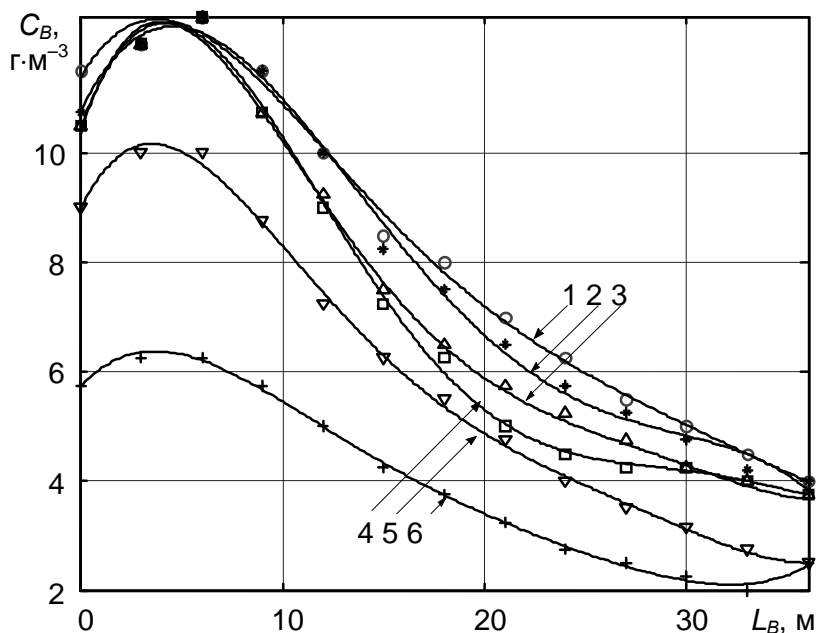


Рис. 2. Модели зависимостей изменения концентраций ПГВС (C_B) внутри очистных сооружений по их длине (L_B)

Полученные кривые (рис. 2) описываются следующими выражениями:

1 – Саратовский НПЗ

$$C_B = 9,3105 \cdot 10^{-7} \cdot L_B^5 - 0,00011657 \cdot L_B^4 + 0,0054604 \cdot L_B^3 - 0,11234 \cdot L_B^2 + 0,6373 \cdot L_B + 11,376; \quad (4)$$

2 – Московский НПЗ

$$C_B = 1,3248 \cdot 10^{-6} \cdot L_B^5 - 0,0001639 \cdot L_B^4 + 0,0076087 \cdot L_B^3 - 0,15537 \cdot L_B^2 + 0,096844 \cdot L_B + 10,639; \quad (5)$$

3 – Ново-Бакинский НПЗ

$$C_B = 2,2888 \cdot 10^{-6} \cdot L_B^5 - 0,00026278 \cdot L_B^4 + 0,011206 \cdot L_B^3 - 0,20767 \cdot L_B^2 + 1,184 \cdot L_B + 10,3398; \quad (6)$$

4 – Бакинский НПЗ

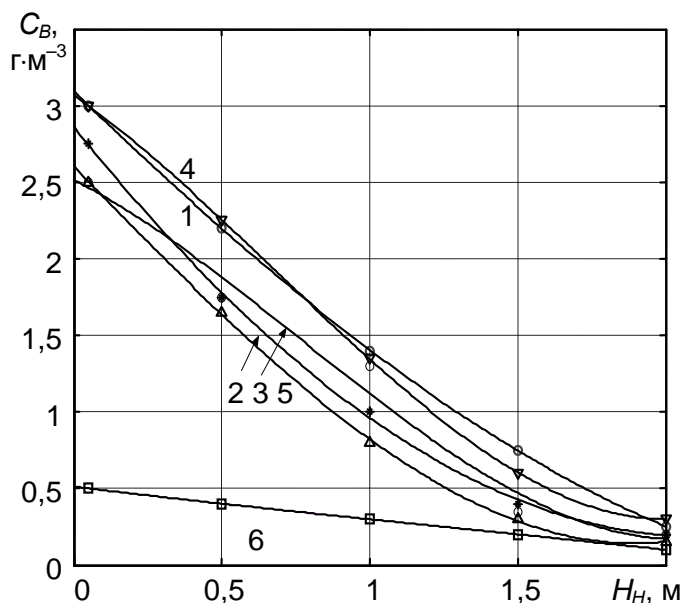
$$C_B = 4,2764 \cdot 10^{-8} \cdot L_B^6 - 3,4353 \cdot 10^{-6} L_B^5 + 1,6436 \cdot 10^{-5} \cdot L_B^4 + 0,0052109 \cdot L_B^3 - 0,15385 \cdot L_B^2 + 1,0169 \cdot L_B + 10,444; \quad (7)$$

5 – Куйбышевский НПЗ

$$C_B = 1,0280 \cdot 10^{-6} \cdot L_B^5 - 0,00010406 \cdot L_B^4 + 0,004117 \cdot L_B^3 - 0,074904 \cdot L_B^2 + 0,40555 \cdot L_B + 5,7115; \quad (8)$$

6 – Рязанский НПЗ

$$C_B = -4,4669 \cdot 10^{-5} \cdot L_B^4 + 0,0038529 \cdot L_B^3 - 0,10708 \cdot L_B^2 + 0,75308 \cdot L_B + 10,761. \quad (9)$$



a

$$1 - C_B = 0,023568 \cdot H_H^3 + 0,49692 \cdot H_H^2 - 4224 \cdot H_H + 2,862; \quad (10)$$

$$2 - C_B = 0,16453 \cdot H_H^3 + 0,064262 \cdot H_H^2 - 2,0122 \cdot H_H + 2,6046; \quad (11)$$

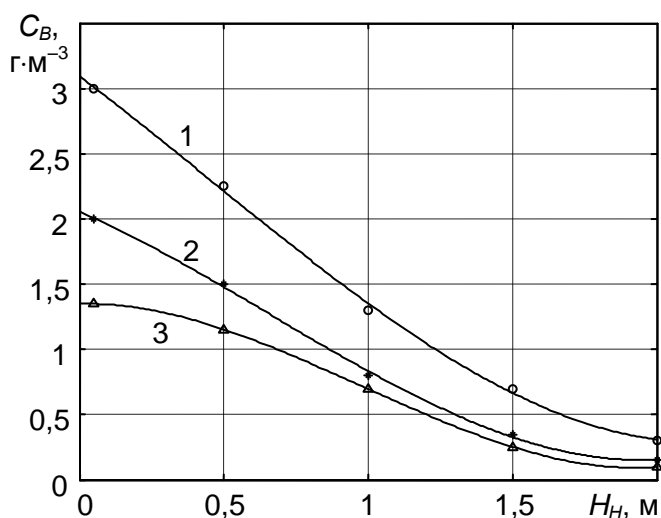
$$3 - C_B = 0,315 \cdot H_H^3 - 0,71959 \cdot H_H^2 - 0,9934 \cdot H_H + 2,5156; \quad (12)$$

$$4 - C_B = 0,037053 \cdot H_H^3 + 0,15683 \cdot H_H^2 - 1,8838 \cdot H_H + 3,0947; \quad (13)$$

$$5 - C_B = 0,35415 \cdot H_H^3 - 0,72285 \cdot H_H^2 - 1,3556 \cdot H_H + 3,0684; \quad (14)$$

$$6 - C_B = -0,0076793 \cdot H_H^3 + 0,029673 \cdot H_H^2 - 0,23444 \cdot H_H + 0,51145. \quad (15)$$

1 – Саратовский НПЗ; 2 – Московский НПЗ; 3 – Ново-Бакинский НПЗ;
4 – Бакинский НПЗ; 5 – Куйбышевский НПЗ; 6 – Рязанский НПЗ



б

$$C_B^1 = 0,20564 \cdot H_H^3 - 0,26739 \cdot H_H^2 - 1,681 \cdot H_H + 3,0949; \quad (16)$$

$$C_B^2 = 0,26398 \cdot H_H^3 - 0,52 \cdot H_H^2 - 0,96628 \cdot H_H + 2,0563; \quad (17)$$

$$C_B^3 = 0,36702 \cdot H_H^3 - 1,0726 \cdot H_H^2 + 0,052099 \cdot H_H + 1,3492. \quad (18)$$

1 – в начале сооружения; 2 – в средней части; 3 – в конце сооружения

Рис. 3. Модели зависимостей изменения концентраций ПГВС (C_B) снаружи очистных сооружений от высоты над ними (H_b): а) по исследованным нефтеперерабатывающим заводам; б) для характерных сечений (на примере Саратовского НПЗ)

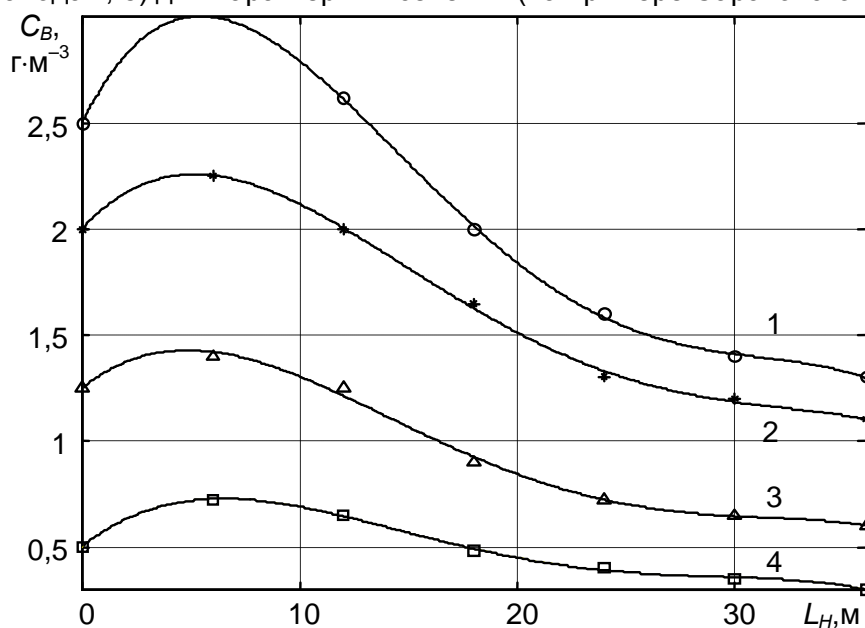


Рис. 4. Модели зависимостей изменения концентраций ПГВС (C_B) снаружи над очистными сооружениями механической очистки по их длине (L_H): 1, 2, 3, 4 – соответственно, на высотах 0,05; 0,5; 1,0; 1,5 м над сооружениями

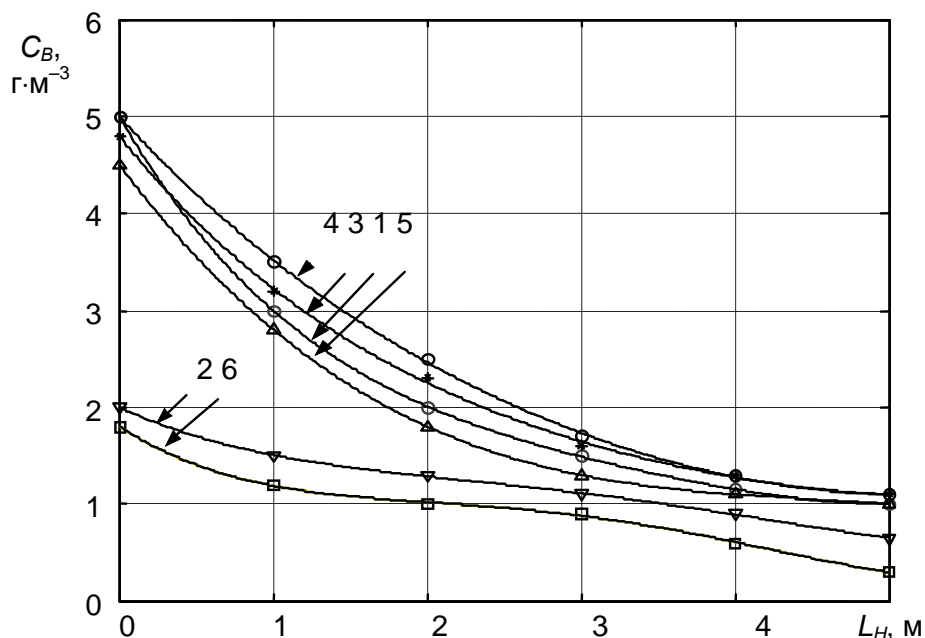


Рис. 5. Модели изменения концентраций ПГВС (C_B) снаружи очистных сооружений в зависимости от расстояния от них в плане (L_H)

Приведенные на рис. 4 зависимости описываются полиномами 6-й степени:

$$C_B^1 = -9,2943 \cdot 10^{-6} \cdot L_H^4 + 0,00085181 \cdot L_H^3 - 0,025276 \cdot L_H^2 + 0,20622 \cdot L_H + 2,5004 ; \quad (19)$$

$$C_B^2 = -4,8222 \cdot 10^{-6} \cdot L_H^4 + 0,00045653 \cdot L_H^3 - 0,013947 \cdot L_H^2 + 0,11055 \cdot L_H + 1,9988 ; \quad (20)$$

$$C_B^3 = -4,1649 \cdot 10^{-6} \cdot L_H^4 + 0,00038025 \cdot L_H^3 - 0,011093 \cdot L_H^2 + 0,082979 \cdot L_H + 1,2455 ; \quad (21)$$

$$C_B^4 = -3,4927 \cdot 10^{-6} \cdot L_H^4 + 0,00030613 \cdot L_H^3 - 0,0088915 \cdot L_H^2 + 0,080718 \cdot L_H + 0,50005 . \quad (22)$$

Полученные кривые (рис. 5) описываются следующими аналитическими зависимостями:

1 – Саратовский НПЗ

$$C_e = 0,010417 \cdot L_H^4 - 0,13102 \cdot L_H^3 + 0,54097 \cdot L_H^2 - 1,0323 \cdot L_H + 1,802 ; \quad (23)$$

2 – Московский НПЗ

$$C_e = 0,011458 \cdot L_H^4 - 0,16134 \cdot L_H^3 + 0,91424 \cdot L_H^2 - 2,7703 \cdot L_H + 5,001 ; \quad (24)$$

3 – Ново-Бакинский НПЗ

$$C_e = 0,0052083 \cdot L_H^4 - 0,068287 \cdot L_H^3 + 0,30382 \cdot L_H^2 - 0,73241 \cdot L_H + 1,9986 ; \quad (25)$$

4 – Бакинский НПЗ

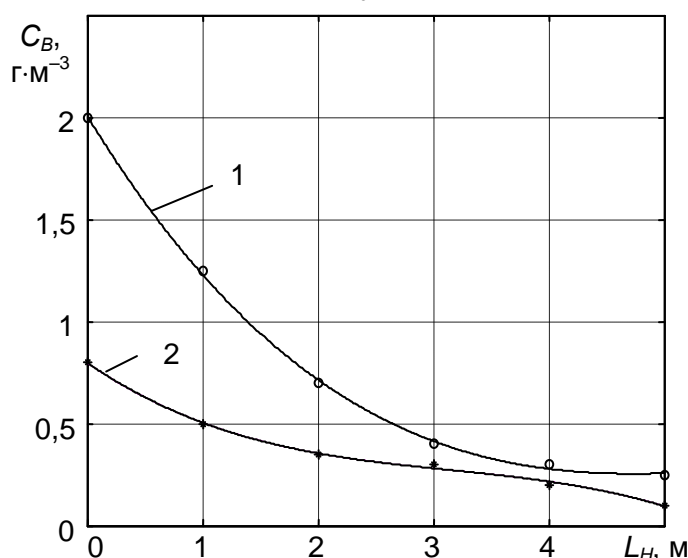
$$C_e = 0,0041667 \cdot L_H^4 - 0,063889 \cdot L_H^3 + 0,4625 \cdot L_H^2 - 1,9742 \cdot L_H + 4,7952 ; \quad (26)$$

5 – Куйбышевский НПЗ

$$C_e = 0,01020833 \cdot L_H^4 - 0,029167 \cdot L_H^3 + 0,28542 \cdot L_H^2 - 1,7369 \cdot L_H + 4,9964 ; \quad (27)$$

6 – Рязанский НПЗ

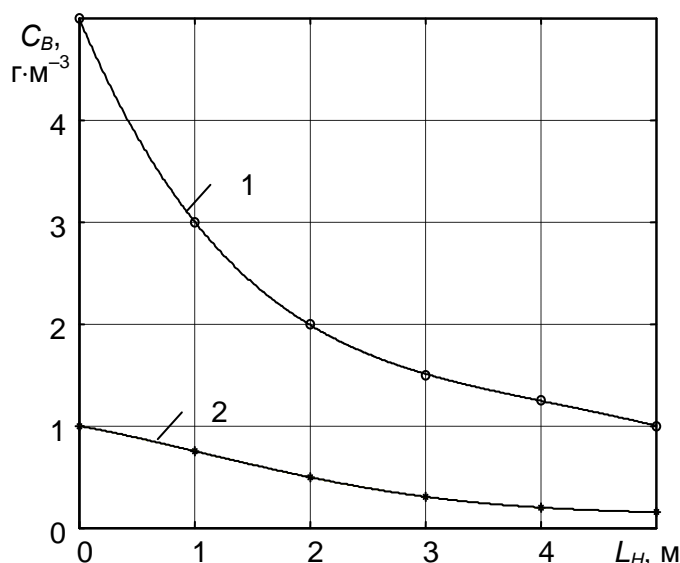
$$C_e = -0,033333 \cdot L_H^3 + 0,45 \cdot L_H^2 - 2,1167 \cdot L_H + 4,5 . \quad (28)$$



а

$$C_B^1 = -0,0083333 \cdot L_H^3 + 0,15714 \cdot L_H^2 - 0,92738 \cdot L_H + 2,0071 ; \quad (29)$$

$$C_B^2 = -0,0111111 \cdot L_H^3 + 0,10476 \cdot L_H^2 - 0,38651 \cdot L_H + 0,79762 ; \quad (30)$$

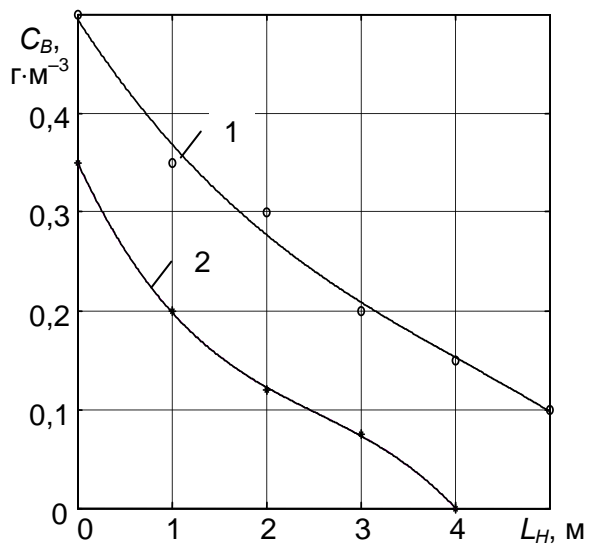


б

$$C_B^1 = -0,0052083 \cdot L_H^4 - 0,10532 \cdot L_H^3 + 0,7691 \cdot L_H^2 - 2,663 \cdot L_H + 4,999 ; \quad (31)$$

$$C_B^2 = -0,0020833 \cdot L_H^4 + 0,024537 \cdot L_H^3 + 0,063194 \cdot L_H^2 - 0,20688 \cdot L_H + 0,9996 . \quad (32)$$

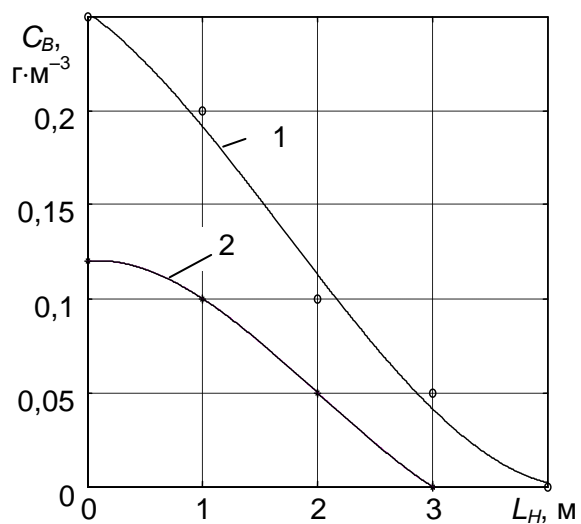
Рис. 6. Модели зависимостей изменения концентраций ПГВС (C_B) на территориях а) песколовок, б) нефтеловушек от расстояния (L_H): 1, 2 – соответственно $C_B=f(L_H)$ для теплого и холодного периода года



а

$$C_B^1 = -0,0018519 \cdot L_H^3 + 0,022817 \cdot L_H^2 - 0,14716 \cdot L_H + 0,49484; \quad (33)$$

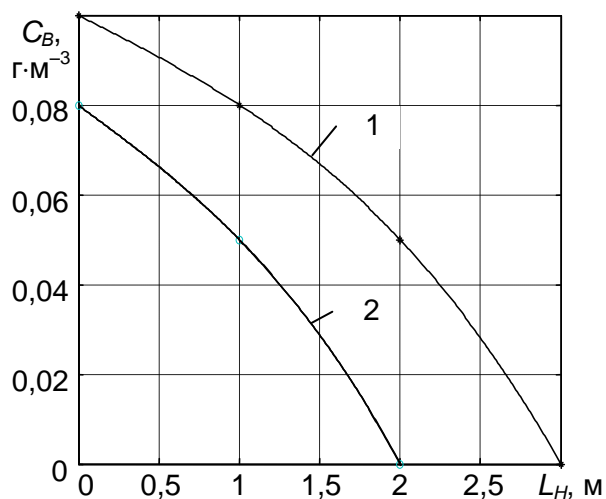
$$C_B^2 = -0,0083333 \cdot L_H^3 + 0,063214 \cdot L_H^2 - 0,20702 \cdot L_H + 0,35043; \quad (34)$$



б

$$C_B^1 = 0,0041667 \cdot L_H^3 - 0,021429 \cdot L_H^2 - 0,043452 \cdot L_H + 0,25214; \quad (35)$$

$$C_B^2 = -0,005 \cdot L_H^3 - 0,03 \cdot L_H^2 + 0,005 \cdot L_H + 0,12; \quad (36)$$



в

$$C_B^1 = -0,0016667 \cdot L_H^3 + 3,3838 \cdot 10^{-1} \cdot L_H^2 - 0,018333 \cdot L_H + 0,1; \quad (37)$$

$$C_B^2 = -0,0033333 \cdot L_H^3 - 0,026667 \cdot L_H^2 + 0,08. \quad (38)$$

Рис. 7. Модели зависимостей изменения концентраций ПГВС (C_B) на территориях:
а – приемных камер; б – камер смешения; в – аэротенков от расстояния (L_H):
1, 2 – соответственно $C_B=f(L_H)$ для теплого и холодного периода года

Выводы

1. Значения концентраций ПГВС существенно изменяются внутри воздушных зон канализационных очистных сооружений по их высоте и длине, имея максимум у поверхности производственных стоков, в начальной части по длине.

2. Значения концентраций ПГВС снаружи очистных сооружений по мере увеличения высоты над ними резко уменьшаются, причем это наиболее ярко выражено в начальной части сооружений, где осуществляется вход на очистку производственных сточных вод.

3. Максимальные значения концентраций на территории очистных сооружений уменьшаются с увеличением расстояния от них в плане, причем такая закономерность характерна для различных сооружений: песколовок, нефтеловушек, отстойников, камер приема и смешения стоков, аэротенков и др.

4. Проведенные исследования показали высокую загазованность, как внутри, так и снаружи канализационных очистных сооружений.

5. По полученным в ходе математической обработки экспериментальных данных аналитическим моделям определяются значения концентрации ПГВС в любой точке по длине и высоте как внутри, так и снаружи канализационных очистных сооружений, что является важным для определения взрывопожарной опасности самих сооружений и загрязнения окружающей воздушной среды.

6. Приведенные модели могут быть использованы для определения значений концентрации ПГВС в различных воздушных зонах как обследованных, так и родственных им сооружений различных отраслей промышленности для разработки защитных мероприятий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Яковлев Б.Н. Взрывная, пожарная и экологическая опасность канализационных очистных сооружений. Саратов: СГТУ, 2001. 104 с.
2. Боровиков В.П., Боровиков И.П. Статистический анализ и обработка данных в среде Windows. М.: Информ-издат. дом «Филинь», 1997. 608 с.
3. Дюк В. Обработка данных на ПК в примерах. СПб.: Питер, 1997. 240 с.

Яковлев Борис Николаевич –

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Эргономика и безопасность жизнедеятельности»
Саратовского государственного технического университета

ГУМАНИТАРНЫЕ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОГО ОБЩЕСТВА

УДК 681.518.2:631.017.3

К.Д. Боскебеев

МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЕМ НА ОСНОВЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Разработан метод прогнозирования, обеспечивающего постоянную корректировку экстраполяционной формулы в соответствии с новыми данными о фактическом значении прогнозируемого параметра управления предприятием с обратной связью исследуемых параметров. Прогноз – целенаправленное сообщение информации о будущих значениях параметров, зависящих от состояния природы и действий субъектов. В рамках этого подхода прогноз рассматривается как средство управления.

K.D. Boskobejev

AN ENTERPRISE MANAGEMENT MODEL ON THE BASE OF FORECAST WITH THE FEED BACK

This article shows that a forecasting method is worked out which is providing constantly correcting extra-polar formula in connection with the new data about the factual number of forecasted parameters of enterprise management with the feedback from the researched parameters. Forecast – centralized message of information about future parameters depended on a weather conditions and subject actions. And a forecast is looked upon as a way of management within the frame of this approach.

Прогноз позволяет избежать критических ситуаций, ошибок и неоправданных издержек в настоящем и будущем при управлении объектом. Предлагаемый элемент управления состоит в наличии обратной связи значений прогнозируемых параметров путем изменения их значений в настоящем. Изменение реальных величин позволяет функционально изменять будущие значения прогнозируемых параметров. Это улучшает эффективность управления предприятием.

В настоящее время имеется большое количество методов прогнозирования, начиная от общенаучных, свойственных всем наукам, и кончая частными, применимыми только для

решения конкретной задачи. Каждый из методов имеет свои особенности в зависимости от цели его использования и уровня проводимых исследований. Исследованию проблем прогнозирования в различных областях человеческой деятельности посвящено колоссальное число работ. Большинство из них описывают технологию (методы) прогнозирования. Эти методы основываются на предположении о неизменности факторов, определяющих развитие изучаемого объекта, и заключаются в распространении закономерностей развития объекта в прошлом на будущее. Вопросы же влияния прогноза на поведение той или иной системы, если и обсуждаются, то, в основном, на качественном уровне. Поэтому в настоящей работе предлагается формальная модель прогнозирования для исследования статистических данных временного ряда функциональной n -мерной зависимости его предыстории прошлых значений с использованием ряда Фурье.

В работе [1] выделяется позитивный конструктивный подход к прогнозированию как активному воздействию на будущее путем планирования, программирования, проектирования и управления явлениями и процессами. В рамках этого подхода прогнозирование не является самоцелью, а составляет основу для принятия решений [9]. В прогнозе в качестве параметров должны фигурировать управляющие переменные (то есть должны анализироваться различные сценарии), и для характеристики места прогноза в принятии решений можно выделить следующую цепочку «прогноз – план – программа – проект – управление» [1, с.21]. Взаимоотношение между прогнозом и принятием решений рассматривается также в [8]: 1) знание лицом, принимающим решение (ЛПР), настоящего состояния описывается в некоторых переменных. Далее, 2) выделяются инструментальные (управляемые) и неуправляемые переменные. 3) Осуществляется предсказание будущих значений неуправляемых переменных в зависимости от значений управляемых переменных – получаются условные прогнозы (сценарии). 4) Оцениваются результаты, то есть сравниваются исходы третьего пункта. 5) Производится выбор значений управляемых переменных, то есть осуществляется принятие решений. Другими словами, формулирование решения в зависимости от текущего состояния отражает политику ЛПР (то есть, механизм принятия решений). Таким образом, в рассматриваемом случае имеет место игра одного активного игрока с пассивным игроком, называемым в исследовании операций «природой». Влияние его прогноза на поведение других субъектов не учитывается (точнее, учитывается пассивно – через прогноз неуправляемых переменных), то есть прогноз в этом случае является не методом управления, а методом устранения неопределенности (условного по стратегии).

Проблемы прогнозирования и управления *активными системами* (АС – системами, содержащими управляемых и/или управляющих субъектов, обладающих собственными целями и способностью принимать решения), рассматриваются в [5]. В формальных (теоретико-игровых и/или имитационных) моделях теории активных систем (ТАС – раздел теории управления социально-экономическими системами, изучающий механизмы функционирования организационных систем и их свойства, обусловленные активностью [3]) центр и агенты выбирают стратегии (действия, состояния, сообщаемую информацию), стремясь максимизировать свои целевые функции, отражающие их предпочтения на множестве действий и/или результатов деятельности. Описание активной системы (ее модель) включает: целевые функции игроков, допустимые множества, последовательность выбора стратегий и информационные ограничения.

Собственно АС погружена в некоторую внешнюю среду, и целью исследователя является создание прогноза развития системы на тот или иной промежуток времени. Как правило, исследователь имеет собственную модель АС (совокупность своих представлений о системе), проводя анализ которой, он может определить, каково будет состояние модели через интересующий его промежуток времени. Следовательно, возникает проблема адекватности модели моделируемой системе. Исследованию этой проблемы посвящено значительное число работ (см. подробности в [6]). Остановившись на обсуждении полученных в них резуль-

татов мы не будем. Обсудим кратко другой аспект отношений исследователя и исследуемой системы.

Одним из методов, применимых как для прогнозирования, так и для решения различных технико-экономических и управленческих задач, является имитационное динамическое моделирование [7]. Основы этого метода были разработаны Дж. Форрестером. Имитационное динамическое моделирование применяется преимущественно для долгосрочных и глобальных прогнозов, так как для своей реализации требует достаточно много машинного времени, что неприемлемо при оперативном прогнозировании. Этот метод в силу особенности подхода позволяет прогнозировать как количественные, так и качественные факторы, что выгодно отличает его от других методов (за исключением методов искусственного интеллекта (ИИ), где также возможна работа с качественной информацией).

Для временных рядов главный интерес представляет описание или моделирование их структуры. Цель таких исследований, как правило, шире моделирования, хотя некоторую информацию можно получить и непосредственно из модели, делая выводы о выполнении тех или иных экономических законов (скажем, закона паритета покупательной способности) и проверяя различные гипотезы (например, гипотезу эффективности финансовых рынков) [8]. Построенная модель может использоваться для экстраполяции или прогнозирования временного ряда, и тогда качество прогноза может служить полезным критерием при выборе среди нескольких моделей. Построение хороших моделей ряда необходимо и для других приложений, таких, как корректировка сезонных эффектов и сглаживание. Наконец, построенные модели могут использоваться для статистического моделирования длинных рядов наблюдений при исследовании больших систем, для которых временной ряд рассматривается как входная информация.

Существует информация между квантами временного ряда, которая, как нам представляется, носит нечеткий характер. Для оценки этой информации предлагаем использовать ряды Фурье. Исследуем этот ряд. Меняя гармонику ряда Фурье, получим различные полиномы на кванте исследования экономического показателя. Полученные таким образом новые знания позволяют менеджеру принимать более четкие решения, например, вкладывать дополнительные финансы в производство или нет.

Этот тригонометрический ряд состоит из суммы постоянной составляющей a_0 и гармонических составляющих a_k и b_k , где k – номер гармоники, начиная с единицы. L – размер выборки [4].

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^m \left(a_k \cdot \cos\left(\frac{k \cdot \pi \cdot x}{L}\right) + b_k \cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot x}{L}\right) \right), \quad (1)$$

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} c_k \sin\left(\frac{\pi \cdot k}{L} + w_k\right). \quad (2)$$

Коэффициенты ряда (1) равны:

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{L} \int_0^{2L} f(x) \cdot dx \\ a_k &= \frac{1}{L} \cdot \int_0^{2L} f(x) \cdot \cos\left(\frac{k \cdot \pi \cdot x}{L}\right) dx \\ b_k &= \frac{1}{L} \cdot \int_0^{2L} f(x) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot x}{L}\right) dx \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Переход от первой формы ряда (1) ко второй форме ряда (2) осуществляется с помощью формул:

$$c_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \quad \text{и} \quad \operatorname{tg} w_k = \frac{a_k}{b_k}, \quad (4)$$

а обратный переход

$$b_k = c_k \cos w_k, \quad a_k = c_k \sin w_k. \quad (5)$$

Будем полагать, что c_k амплитуда – это объем продукции.

Рассмотрим способ теоретического исследования временного ряда. Пусть известна функция $f(x)$, которая равно x аргументу. Значения приведены в таблице.

Исходные данные

| | | | |
|--------|---|---|---|
| x | 1 | 2 | 3 |
| $f(x)$ | 1 | 2 | 3 |

Анализ и исследование функции провели с помощью инструментального средства MATHCAD 2003.

Предлагается расчет математической модели по формуле (6) при десяти гармониках ряда Фурье, а исходной данной является $f(x)=x$.

$$fr1(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{10} \left(a_k \cdot \cos\left(\frac{k \cdot \pi \cdot x}{L}\right) + b_k \cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot x}{L}\right) \right). \quad (6)$$

График представлен на рис. 1 по уравнению (6) на основе фактического и расчетного показателей. При сравнении математической модели и реальной картины в некоторых точках амплитуды ошибка оказалась большой.

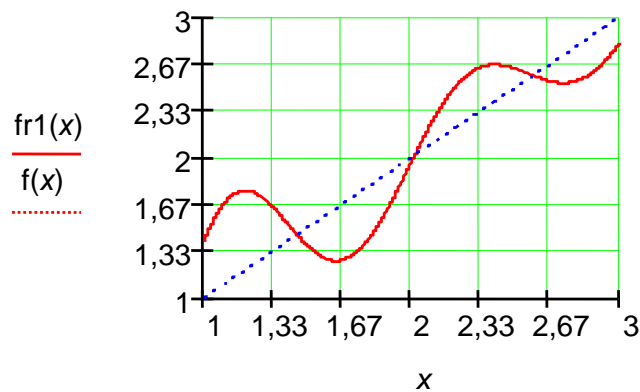


Рис. 1. Функция изменения параметра фактических и расчетных данных при гармонике $k=10$

Математическая модель для пятидесяти гармоник ряда Фурье рассчитывается по формуле (7)

$$fr2(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{50} \left(a_k \cdot \cos\left(\frac{k \cdot \pi \cdot x}{L}\right) + b_k \cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot x}{L}\right) \right). \quad (7)$$

График представлен на рис. 2 по уравнению (7) на основе фактических и расчетных показателях.

При увеличении количества гармоник ошибка между математической моделью и реальными значениями стремится к нулю. В результате исследования каждой гармоники ряда Фурье было обнаружено, что гармоника определяет качество математической модели, приведенной на графике рис. 1 и рис. 2. С увеличением количества гармоник точность модели повышается, что улучшает качество прогноза.

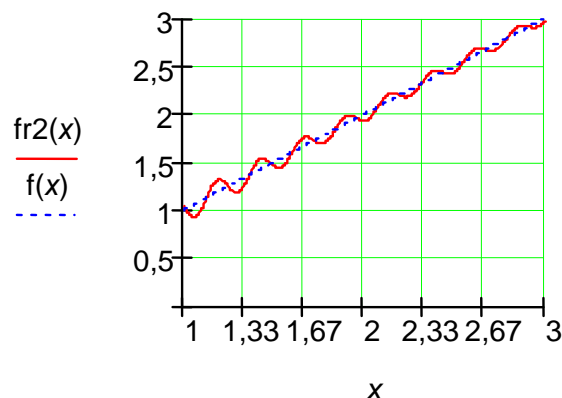


Рис. 2. Функция изменения параметра фактических и расчетных данных при гармонике $k=50$

Таким образом, при оперативном управлении и мониторинге производства, менеджер управляет производственной системой и продуктовыми потоками, координирует работу отдельных установок и комплексов, анализирует состояние товарно-сырьевого хозяйства, может достичь стабилизации процесса и хорошего уровня выпуска продукции на основе прогнозирования.

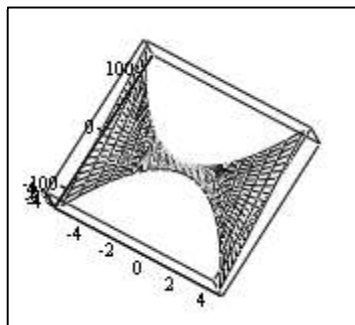
В процессе принятия решений менеджером возникает необходимость получения краткосрочных прогнозов развития ситуаций по принимаемым решениям с целью анализа их реализуемости и обоснованности. Предварительная проверка поведения системы и получение прогноза ситуаций позволяют избежать критических ситуаций, ошибок и неоправданных издержек в настоящем и будущем.

При моделировании производственных процессов возникает необходимость введения функциональной многомерной зависимости экономических показателей.

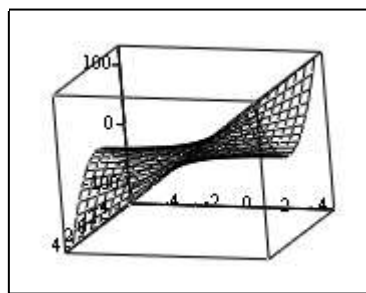
Предлагается метод управления предприятием функциональной n -мерной зависимости.

Этот метод позволяет выявить наилучший показатель из двух параметров многомерной функции, т.е. исследовать управление функциональной зависимости попарно. Рассмотрим пример. В кассу поступают деньги от реализации готовой продукции. Следовательно, количество готовой продукции на складе уменьшается. Есть функциональная связь между вводом данных наличных денег и количеством реализуемой продукции.

Двухмерная $f(x,y)$ или многомерная функция $f(x,y,z)$ определяет ситуацию управления предприятием, где x , y , z – экономические показатели (x – поступление денег, а y – реализуемая продукция). Поступление денег меняется по линейному закону, а продукции - по второй степени, тогда функциональная зависимость выглядит следующим образом $z(x,y)=x \cdot y^2$. Эта функциональная зависимость отражена на рис. 3.



z



z

Рис. 3. Поступление денег в кассу после реализации продукции

Функциональная многомерная зависимость экономических показателей имеет отражение причинно-следственных связей между отдельными показателями системы, как между условием, так и действием, что позволяет улучшить качество управления производственным процессом с обратной связью.

Таким образом, разработана теоретическая модель управления предприятием на основе прогнозирования с обратной связью, которая позволяет снизить критические ситуации, связанные с неритмичностью поставок сырья и отгрузок продукции, внеплановыми простоями установок, авариями, а также дает возможность планировать производство и вносить корректирующие изменения.

Выводы

1. Создается формальная модель в теории управления социально-экономическими системами, изучающими механизмы функционирования организационных систем и их свойства.

2. Предлагается формальная модель прогнозирования для исследования статистических данных временного ряда функциональной n -мерной зависимости его предыстории прошлых значений с использованием ряда Фурье.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бестужев-Лада И.В. Окно в будущее. М.: Мысль, 1970. 269 с.
2. Бурков В.Н. Основы математической теории активных систем. М.: Наука, 1977. 255 с.
3. Бурков В.Н., Новиков Д.А. Теория активных систем: состояние и перспективы. М.: Синтег, 1999. 128 с.
4. Кудрявцев Л.Д. Краткий курс математического анализа: Учебник для студентов университетов и вузов: В 2 т. М.: Высшая школа, 1981. Т. II. 584 с.
5. Новиков Д.А. Активные системы: управление и прогнозирование // На пути к устойчивому развитию: Труды Междунар. конф. СПб., 1996. С. 18-20.
6. Новиков Д.А. Обобщенные решения задач стимулирования в активных системах. М.: ИПУ РАН, 1998. 68 с.
7. Новиков Д.А. Механизмы стимулирования в динамических и многоэлементных социально-экономических системах // Автоматика и телемеханика. 1997. № 6. С. 3-26.
8. Тейл Г. Экономические прогнозы и принятие решений. М.: Статистика, 1971. 488 с.
9. Jenkins G.M. Some practical aspects of forecasting in organizations // Journal of forecasting. 1982. Vol. 1. P. 3-21.

Боскебеев Кылыч Джетмишбаевич –

старший преподаватель кафедры «Информационные системы в экономике»
Кыргызского национального технического университета им. И. Раззакова, г. Бишкек

УДК 11

Ю.М. Дуплинская

ЛОГИКА ПОДТЕКСТА: АНТИМИРЫ И ИЗНАНОЧНЫЕ МИРЫ СЕМАНТИКИ

Проводится анализ структур неявного отрицания, без которых не может сформироваться рационально постигаемый смысл. Подобно тому, как ясное и отчетливое восприятие предметов возможно только при наличии контрастного фона, ясное и отчетливое понимание смысла языковых выражений возможно только при наличии неявного отрицания, – импликаций иного («это, а не...»). Эти импликации, как правило, не проговариваются отчетливо и до конца не осознаются носителями дискурса, составляя не текст, а подтекст высказываний. Для характеристики этого типа отрицания уместным будет не термин «анти», а метафорическое выражение «изнаночная сторона» текста. Различие между терминами «противоположный» и «изнаночный» лучше всего иллюстрируется именно при помощи топологических образов: встреча противоположностей возможна в том же самом семантическом поле, что никак невозможно по отношению к «изнаночной стороне» текста: она всегда «по ту сторону» – то есть в подтексте – такова топология изнанки.

Y.M. Duplinskaya

**LOGIC OF UNDERLYING IDEA:
ANTIWORDS AND INSIDE OUT WORDS OF SEMANTICS**

The article describes analysis of structures of non vivid denial without which cannot be formed rationally understandable meaning. The author is showing the importance of differences in the language said and meant. The studies in the article demonstrate the presence of the implications in the language, which are quite often not even properly understood by the language carriers of the discourse, i.e. the speakers. The differences between in terminology of «opposite» and «inside out» are better illustrated with the help of topological images. And that is possible in the semantic sphere as well.

Существуют две различные схемы в осмыслении негативного. (Здесь имеется в виду бытие, взятое в аспектах его негации в любой форме: небытие в онтологии или неистинность в гносеологии, зло в этике или безобразное в эстетике).

1. Первая схема связана с архаическими мифологиями. Она, если говорить кратко, такова: нет небытия, а есть лишь анти-мир. Все негативное здесь осмысляется по логике антиподов. Для архаической мифологии основополагающим является архетип дуальности, или агональности. Ничто означает здесь не абсолютное небытие, а другое Нечто. Все состояния универсума архаики считались оборачиваемыми: жизнь и смерть, святое и нечистое, Бог и мир, Бог и дьявол (Дж. Фрэзер показывает, что у этнографических народов система табу, которая налагается на священную особу вождя, почти ничем не отличается от системы табу, налагаемой на нечистую особу роженицы [6]; по мнению К.Г. Юнга, архаическое представление о Боге включало в Бога природу дьявола [7]. Поэтому отрицание для архаического сознания никогда не было чистым «не», – оно всегда имело положительный аспект *другого* мира: дьявол – это Бог преисподней, смерть аналогична положению Солнца в закате и т.д. Схема такова: светило может быть в разных фазах, – в фазе заката и в фазе зенита. Аналогичны отношения между Богом и дьяволом, Богом и человеком, между жизнью и смертью: демон – это тот же Бог, но в другой фазе, подобной Солнцу в фазе заката ; такова же и смерть по отношению к жизни. В этой картине

состояние смерти означало не чистое небытие, а воплощение в анти-мире. Мифологическая онтология – это как бы «абсолютно плотный мир», мир, в котором отсутствует чистое «не».

2. Вторая схема осмысления негативного связана с рациональным дискурсом: «не» здесь связано не с импликацией «анти-мира», а означает просто отсутствие, несуществование, которое вовсе не должно иметь какой-то позитивный коррелят. Формирование рационального дискурса совершается одновременно с «прореживанием» мифологических онтологических структурами чистого небытия, без которого невозможна устойчивость «ясного и отчетливого» постижения.

Нужно подчеркнуть, что «не» рационального дискурса нельзя путать с тем мистическим прорывом в сферу трансцендентного, которое также описывается в терминах чистого «не». «Не» апофатической бездны, которое открывается в недрах мистического опыта – это нечто принципиально иное, чем «не» как структура дискурсивного отрицания. Если в первом случае совершается некий прорыв за пределы любого возможного дискурса, то во втором случае отрицание не выводит за рамки дискурса. Это – отрицание, которое обусловлено не прорывом за пределы реальности, а лишь смещением восприятия внутри этой же реальности. Отрицательная компонента рациональных структур не открывает настоящего небытия, а формируется как сеть своеобразных «сгущений» и «разрежений» внутри сущего, обуславливаясь перефокусировкой взора и векторностью восприятия.

Если мифологическое сознание можно сопоставить с расфокусированным взором, то рациональное постижение является векторным. Сфокусированность сознания обозначается термином «интенциональность». Из сплошного массива реальности оно выхватывает отдельные компоненты – предметы познания, а остальное удаляет в тень, производя как бы разделение реальности на «вещи» и «фон». Мифологическая двойственность бинарных оппозиций смещается, таким образом в асимметричные структуры «вещей» и «фона».

Проблему «фона» следует сделать предметом более пристального рассмотрения. Восприятие света возможно только по контрасту с промежутками тьмы, восприятие звука – по контрасту с промежутками тишины. Аналогичным образом, для рационального постижения необходим контраст: понимать нечто «ясно и отчетливо» можно только по контрасту и на фоне чего-то другого. У каждой «ясной и отчетливой» идеи есть обычно не фиксируемый сознанием «фон», – своего рода «воздушная среда», в которую она погружена, благодаря чему становятся четкими контуры идеи. В тех типах рациональности, где возникает ориентация на «ясное и отчетливое» постижение, предполагается особо сильная роль некоего скрытого подтекста, который здесь выполняет функцию, аналогичную контрастной функции фона в зрительном восприятии. Но хотя рациональное мышление невозможно без фона, для самого *ratio* этот фон эквивалентен небытию. Взор познающего сознания всегда направлен от... к... (вспомним архетипический сюжет платоновской пещеры: взор прикованных рабов всегда направлен в одну сторону; они не могут обернуться). Таким образом, мифологическая структура дуальности (обратимое мышление) смещается в структуру «вещи – фон» рационального мышления (векторное мышление). Фон и вещи соотносятся между собой не по принципу дуальности, а по принципу «лицевой» и «изнаночной сторон», текста и подтекста. Причем именно это смещение формирует предельные абстракции рационального мышления. Подобно тому, как первое деяние демиурга в любой космогонии – это разделение света и тьмы, так и первый дорефлексивный настрой сознания – это смещение онтологии, в результате которого происходит организация реальности по принципу «вещи – фон». Поэтому любое «логическое объяснение», по сути дела, является квазиобъяснением, так как настоящие предельные основания любой идеи заключаются лишь в ее контрасте с некоторым «фоном», – подтекстом. Может быть, смысл призыва ранней феноменологии «учиться видеть»

заклучался в том, что мышление не имеет иных предельных оснований, нежели некий дорефлексивный настрой сознания, одномоментно производящий разбиение универсума на «вещи» и «фон», на котором они созерцаются. Рефлексирующее сознание, схватывая «вещи», обычно не фиксирует того «фона», который делает контуры вещей ясными и отчетливыми, подобно тому, как, воспринимая вещи, мы не обращаем внимания на промежутки пустоты, делающие их различимыми, а, слушая музыку, мы не обращаем внимания на паузы тишины между звуками.

Подчеркнем следующее: в данном случае следует ставить вопрос не о поисках и изысканиях чего-то нового, но именно о смещении угла зрения: все, что постигается ясно и отчетливо, может быть ясным и отчетливым только на фоне чего-то Иного.

Структура «вещи – фон» связана также с такой характерной структурой дискурса сигнификации, как структура «текст и подтекст». Рационализированный дискурс всегда имеет некий подтекст. Подобно тому, как ясное и отчетливое восприятие предметов возможно только при наличии контраста, ясное и отчетливое схватывание смысла языковых выражений возможно только при наличии *импликаций Иного*. Последние никогда не проговариваются до конца и, как правило, не осознаются носителями дискурса, составляя не текст, а подтекст высказываний.

Характеристику подтекста рационального мышления можно уточнить, назвав его «отрицающим подтекстом». Для концептуального дискурса в роли фона-подтекста всегда выступают полемические импликации (импликации типа «это, а не...»), которые, не проговариваясь в тексте, обязательно содержатся в подтексте, даже при видимой нейтральности текста. Давно замечено, что рациональное мышление по своей сути есть замаскированная критика. Импликация «а не...» является конституирующим условием ясного и отчетливого концептуального мышления, в котором каждое утверждение оформляется имплицитным отрицанием других возможных утверждений.

Заметим: все то, что мы считаем «предельными основаниями» нашего культурного мира, отнюдь не является таковыми. То самое «ничто», которое сформировало архетипы современного сознания, – отнюдь не является первоначальным состоянием. «Ничто» привычных для нас культурных форм явилось результатом отрицания другого «нечто», – «нечто» более глубоких пластов дискурса. Семантика формообразований классической культуры воспринимается нами ясно и отчетливо благодаря контрасту с неким реликтовым фоном.

Мы забыли о том, что все архетипические схемы нашей культуры возникали не как самодовлеющий образец, но обретали свой первоначальный смысл лишь в контрастных отношениях оппозиции и критического преодоления эпистемологического поля радикально иного типа. Изначальный смысл любой рациональности есть критика, и любая рационализация возникает именно из потребностей критики. И лишь впоследствии исходный, – отрицательный, – смысл классических сюжетов и схематизмов мысли был забыт и обрел превращенную форму смысла самодовлеющего.

В связи с этим следует высказать некоторые соображения по поводу так называемой «первозданной простоты», поиски которой периодически предпринимает философская мысль в ходе прояснения своих онтологических первооснов. С рождением «первозданно ясных» и простых смыслов, которые, возникая как бы на фоне *tabula rasa* (ср. библейское «ничто»), являются образцами для всего последующего развития культуры, связывают представление о «классических эпохах». Мысль периодически возвращается к таким эпохам, ища в них свои собственные истоки. Мысль время от времени совершает повороты «вспять», когда под выросшим лабиринтом культуры пытается обнаружить ту первоначальную простоту и ясность смысла, в которой нельзя было бы усомниться. Но тот же самый опыт истории мысли говорит нам, что менее всего первоначальности заключено как раз в том, что нам представляется наиболее «простым» и «ясным». Так, например, те «естественный свет разума» и

«естественный человек», к которым апеллировала классическая философия Нового времени, явились мифом поздних исторических эпох, пришедших на смену гораздо более усложненной культуре. И пресловутая простота этого самого «естественного света» разума формировалась отнюдь не как первоизданная, а скорее, как отрицающая реалья, по отношению к усложненности предшествующей культуры. Ясно постигать нечто можно только на фоне чего-то другого. Поэтому именно в том типе рациональности, где возникает ориентация на «ясное и отчетливое» постижение (классический рационализм), предполагается особо сильная роль некоего скрытого *подтекста*, который здесь выполняет функцию, аналогичную контрастной функции фона в зрительном восприятии. Аналогичным образом, все то, что имеет видимость онтологических реалий культуры, может заключать в себе скрытый от нашего взгляда мощный культурно-исторический подтекст, на отрицании которого и по контрасту с которым они только и могут мыслиться как простые, ясно и отчетливо постигаемые сущности. Но, опять-таки, постигающий разум, схватывая вещь, обычно не фиксирует того фона, который делает контуры вещи ясными и отчетливыми.

Все доступное восприятию на чем-то отпечатано; всякое доступное пониманию слово начертано на смысловом массиве другого текста. Чтобы пояснить эту мысль, приведем одну очень интересную идею из области эстетики, которая принадлежит Ю.М. Лотману. Заключается она в следующем. Казалось бы, язык прозы – это то, на чем лежит печать первоизданности. Он как будто возникает на фоне того самого библейского «ничто», или, используя уже не библейский образ, а образ классического рационализма, на фоне *tabula rasa*, «чистого листа» сознания. Однако история культуры говорит нам, что изначальным эстетическим языком являлся не язык прозы, а язык поэзии. Причем, согласно архаическому поэтическому канону, этот язык должен быть «темен», и слишком ясное слово считалось в нем стилистической погрешностью. Основой классического художественного языка является язык прозы. Но язык прозы, именно вследствие его видимой «простоты», не является эстетически первоизданным. Простота прозаического текста приобрела эстетическую значимость лишь *по контрасту* с предыдущим усложненным и насыщенным условностями языком древней поэзии. Эстетика прозаического художественного текста – это эстетика опущенных тропов и громоздких речевых оборотов, – своего рода эстетика со знаком «не», «негатив» предшествующей эстетики [3]. Например, считая А.С. Пушкина основоположником русского литературного языка, мы сегодня забываем, что для его современников, возможно, эстетическую насыщенность этот язык приобретал во многом из-за контраста с вычурным языком Тредиаковского, Державина, Сумарокова и т.д. Мы уже перестали чувствовать «отрицательный» подтекст эстетики классического художественного текста, – эстетики опущенных пышных метафор и эпитетов, – и поэтому у нас возникает иллюзия первоизданной простоты этого текста. Между тем, язык прозы, в той мере, в которой он сохраняет эстетическую ауру, располагается как бы в пустотах более изначальной эстетики, – эстетики поэтического текста, в который он оказывается вписанным.

Возможна экстраполяция этой идеи. Смысловую насыщенность всем реалиям классической культуры, – в том числе идеям интеллектуальной интуиции, – первоначально придавал именно отрицательный и отрицающий подтекст, – подтекст, играющий роль фона, который уже не чувствуется нами сегодня.

Явное дихотомическое строение архаического дискурса трансформируется в скрытую оппозицию между текстом и подтекстом в дискурсе рациональном. Структуры антиподов в рациональном дискурсе смещаются в иной, отличный от мифологического тип двойственности. О нем следовало бы говорить не столько как о противоположности существующей реальности (что и выражается термином «анти»), сколько как об *изнаночной стороне* реальности. Изнаночная сторона, в отличие от противоположности, предполагает не отношения контрастности, а отношения контрадикторности, но однако некоей немыслимой контрадикторности, взятой в позитивном аспекте. Изнаночный мир, в отличие от антимира, строится не по логике контрастности, а по логике *вырезывания*. Постигание изнаночной реальности требует не столько открытия чего-то

другого, сколько своеобразной *перифокусировки* взгляда, наподобие того, когда при рассмотрении узора внимание переключается с рисунка на тот фон, на котором изображен рисунок. Или еще это можно уподобить попытке представить вогнутую сторону выпуклой поверхности. По этому поводу в очередной раз напомним призыв ранней феноменологии «учиться видеть»: не изыскивать или создавать что-либо еще, а просто видеть то, что всегда *уже здесь*. Изнаночная реальность, таким образом, связана не столько с идеей противоположности, сколько с перифокусировкой взора в некоем сплошном универсуме. Причем здесь важно сохранить также топологическую нагруженность термина «изнаночный». Различия между терминами «противоположный» и «изнаночный» лучше всего иллюстрируются именно при помощи топологических образов. Встреча с собственной противоположностью происходит в *той же самом* семантическом поле, что никак невозможно по отношению к собственной изнаночной стороне: она всегда «по ту сторону», – такова топология изнанки.

Онтология изнаночной реальности прекрасно описывается П. Флоренским. П. Флоренский дает интерпретацию того, что такое мнимые числа в математике: $\sqrt{-1}$ означает существование отрицательной площади, которая может быть понята как площадь на изнаночной стороне поверхности. В связи с этим П. Флоренский развивает учение о «двусторонних» феноменах, которые имеют «лицевую» и «изнаночную» стороны. Так, материя и дух не обусловлены друг другом; ничто из них не является ни первичным, ни вторичным. Просто материя и дух – это две стороны одного и того же феномена, которые по отношению друг к другу находятся в «обратном», или «вывернутом» отношении: в духовном мире вывернутое по отношению к материальному миру пространство, обратная причинность (от следствия к причине) и обратное течение времени (от будущего к прошлому) [5]. В свете изложенной концепции возникновение слова, как и феномен взаимоизнаночных отношений между материей и духом, можно объяснить смещением онтологии, закрывающим прямую связь между «горним» и «дольным» мирами. Лицево-изнаночная связь посредством слов, в отличие от синергии, является связью косвенной.

Можно предложить аналогичную интерпретацию и других феноменов. Здесь тоже речь идет не о первичности одного по отношению к другому и не о взаимообусловленности одного другим, наподобие диалектических противоположностей, а о наличии двух сторон, «лицевой» и «изнаночной» у *одной и той же* сущности, которую мы не можем увидеть сразу как единое целое (подобно тому, как искривленную поверхность мы можем видеть то с выпуклой, то с вогнутой стороны, но никогда с обеих сторон одновременно, – для этого потребовался бы выход в пространство четырех измерений).

Все культурные феномены имеют «лицо» и «изнанку». Структура смысла, согласно концепции Ж. Делеза, – это структура поверхности; «глубина и высь» смысла не уведут нас с поверхности, а составляют лишь ее изнанку [2]. Там, где мы имеем дело со сферой смысла, любое движение будет вращаться в замкнутом кругу «лицевой» и «изнаночной» сторон культуры, создавая иллюзию, что производится прорыв к Бытию, Богу или чему-нибудь в этом роде. В ходе развития культуры совершается многократное переворачивание поверхности, приводящее к умножению изнаночных миров. На закате культур формируется абсолютно плотный мир смысла, в котором для всякого утверждения возможна альтернатива. В глубине любого текста всегда может быть открыт изнаночный подтекст, который, тем не менее, не может увести «вглубь» или «ввысь», поскольку является изнанкой поверхности. Все проявленные миры имеют изнаночную пару, но все они расположены на одной и той же поверхности. Можно поставить вопрос: как часто, когда нам кажется, что мы говорим о Боге или о любом опыте «потустороннего», мы попадаем всего-навсего на изнаночную сторону *той же самой* культуры? Обратим внимание на зависимость опыта потустороннего от имеющихся культурных форм. Так, греки, боготворившие видимые формы, символ высшей мудрости полагали в слепоте, а средневековые, обожествлявшие Слово, символом высшего постижения считало молчаливость.

Более грамотная экспликация как темы фона, так и темы изнанки дискурса, возможна только на основе анализа темпоральных структур. «Фон» и «изнанка» – это всего лишь метафоры, причем метафоры, связанные со зрительным восприятием. Между тем, коль скоро идет речь о дискурсе, то более уместными оказываются не пространственные метафоры (предполагающие зрение или умозрение в качестве своего коррелята), а метафоры энергийные и связанные с ними структуры темпоральности.

Смещенные энергии являют себя в нашем мире как *время*, и интенсивность сохраняет свое бытие лишь в течении темпоральных потоков. Собственная стихия слова – это не пространство, а время, и фоном для слова может быть иная темпоральность. Тогда «лицо» и «изнанка» текста – это встреча двух потоков с разной темпоральностью, один из которых течет как бы сквозь другой и вспять по отношению к другому. При всей видимой экзотичности, эти образы допускают вполне конструктивное рассмотрение и могут быть спроецированы на такую область современной философии, как теория значения. Согласно одной из теорий значения (например, М. Мерло-Понти), слово является своеобразным эквивалентом телесного жеста [4]. Но ведь слово – это не удвоение, а, скорее, некая отсрочка жеста. Слова фиксируют темпоральные задержки в осуществлении намерения, которые заполняются иной жесту материей, – материей звука. Таким образом, текст – это своеобразный звуковой и темпоральный «негатив» жеста. И, рассуждая далее, разве все ухищрения словесного творчества предназначены для того, чтобы передавать смысл прямо и непосредственно? Нет, они, скорее всего, нужны как способ отсрочки в передаче чего-то, что ясно без слов. Ведь, как известно, понимание смысла никогда не совершается по «линейной» логике, от одного означающего к другому. Смысл есть некий гештальт, который либо схватывается сразу, либо не схватывается вообще. Если же рассматривать уже готовый текстовый массив, то каждый последующий текст как бы вписывается в промежутки более древних, причем темпоральность последующих текстов накладывается на темпоральность предыдущих как некое течение вспять (темпоральность задержки, отсрочки).

Таким образом, если мы говорим, что смысл слова может улавливаться по контрасту с восприятием «фона», то слово «фон» здесь имеет метафорический смысл и, конечно, отличается от того зрительно воспринимаемого фона, на котором воспринимаются видимые объекты. Фон, в роли которого в данном случае выступает «отрицательный *подтекст*» подразумеваемого отрицания другого «нечто», в отличие от зрительно воспринимаемого фона, формирует контрастность не геометрического, а, скорее, «силового» характера: контрастность интенсивности и темпорального смещения. Слово, как правило, течет сквозь темпоральный поток некоего другого текста, не осознаваемого рефлексивным сознанием. Текст, который осознается нами, имеет энергийную плотность лишь постольку, поскольку он преодолевает своеобразное «темпоральное препятствие» некоего другого, неосознаваемого нами текста. По упоминавшейся концепции прозы Ю. Лотмана, язык прозы имеет эстетическую значимость на фоне более перевозданного, – поэтического текста. Если можно так выразиться, он, как некое движение вспять, течет сквозь темпоральность иной эстетики – эстетики поэзии. Поэзия А. Пушкина многое утратила для нас, – утратила *сопротивление подтекста*, подтекста иной эстетики, сквозь которую протекал стихотворный язык А. Пушкина в восприятии его современников. Это наблюдение можно обобщить. Слово удерживает свой смысл лишь постольку, поскольку оно протекает сквозь некое иное движение, – движение другого текста, движение жеста, движение действия и т.д. Смысл не может сформироваться без того, что может быть названо *сопротивлением подтекста*, которое существует, наподобие сопротивления некоей упругой среды, сквозь которую прорубает свою дорогу Слово. В художественном языке, например, это – энергийная среда иной эстетики. В теоретической мысли это – сопротивление иной концептуальной системы и т.д.

Сопротивление подтекста заставляет нас каждый раз делать усилие при восприятии смысла, придавая смыслу тем самым «энергийные» характеристики. Причем это самое уси-

лие сознания является необходимым условием для конституирования смысла. Поэтому для формирования смысла необходимо наличие контраста, который заставлял бы каждый раз возобновлять усилие сознания.

Нами не осознавалось, что все то, что попадает в поле ясного прочтения смыслов, порождаемых культурами (то есть собственно «текст»), всегда оказывается вложенным в иное, неосознаваемое становление. А это значит, что существует еще некий изнаночный поток эволюции, который направлен вспять по отношению к осознаваемой нами эволюции формообразований культуры. Всякий текст имеет «вектор» прочтения и всегда течет как бы сквозь иное становление, создающее то, что было названо «сопротивлением подтекста», без которого оказывается невозможным смыслообразование.

Все эти рассуждения сделаем наглядными при помощи образа-аллегии, относящейся к разряду космологических фантазий. Наш мир возможен лишь на фоне чего-то, которое наш взгляд фиксирует в качестве «ничто». Но то, что нами воспринимается как «ничто», может оказаться «нечто» радикально иного универсума. И аналогично, «нечто» нашего мира может оказаться тем «ничто», которое формирует фон для иного универсума. Слово порождается некоей интенцией, которая направлена вспять по отношению к изначальной темпоральной эволюции Вселенной. Смысл возникает на стыке двух противоположно направленных темпоральных потоков, являясь своего рода граничным феноменом. Приведем аналогии, которые здесь напрашиваются. Конечно, прежде всего вспоминается аналогичная концепция П. Флоренского о двух взаимоизнаночных половинках символа. Другая сходная идея содержится в концепции Н. Винера, который считал, что существуют миры, уравнивающие темпоральное течение нашего мира: время в них течет из будущего в прошлое, эволюция вещества совершается от процессов с большей энтропией к процессам с меньшей энтропией. Но сообщение с такими мирами невозможно: те сообщения, которые они посылали бы нам, у нас выглядели бы как стихийное разрушение ландшафта. Поэтому существование таких миров недоказуемо. Но, по-видимому, были бы бессмысленными именно поиски отдельных фактов, в которых бы манифестировали себя подобные миры. Изнаночный мир пронизывает наш мир в каждой точке, и поэтому чувствуется всегда по особой энергетике, своеобразной «интенсивности» среды, которая создается как бы упругим сопротивлением Иного. Энергия и Время – это феномены, которые по своей сути не могут быть поняты сами из себя и как будто указывают на некоторую изнаночную реальность.

Можно высказать еще более радикальное предположение (подкрепляемое, в данном случае, лишь интуицией). Возможно, существует некий «прямой» поток эволюции универсума (и также «прямой» поток течения сознания), который протекает в нас беззвучно. Мы можем узнать о нем только в «изнаночном» прочтении, воплощая его в слове. Все, что мы можем осознать, – это лишь зеркально перевернутое воплощение реальности, так как тот поток, который позволяет нам осознать реальность, направлен вспять по отношению к Изначальному. (Аналогия: П. Флоренский считал, что те сны, которые вспоминает наше дневное сознание, – это лишь обратное прочтение тех видений, которые на самом деле являлись нашему ночному сознанию; сон мы вспоминаем в обратном порядке по отношению к его реальному развертыванию). Символичным в этом плане является то, что эзотерические тексты пишутся справа налево, – то есть вспять по отношению к обычной ориентации письма.

Ощутить «подлинную», то есть изнаночную по отношению к осознаваемой, реальность, мы можем лишь по своеобразному «упругому сопротивлению» среды, – сопротивлению Иного, которое создает что-то наподобие «интенционального ветра» в тексте. Прочитаем по этому поводу Гейдара Джемаля: «Сквозь реальность дует ветер Иного, не поднимающий волн».

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуссерль Э. Идеи к чистой феноменологии и феноменологической философии. М.: Дом интеллектуальной книги, 1996. 332 с.
2. Делез Ж. Логика смысла. М.: Академия, 1995. 299 с.
3. Лотман Ю.М. Структура художественного текста. М.: Искусство, 1970. 389 с.
4. Мерло-Понти М. Феноменология восприятия. СПб.: Ювента. Наука, 1999. 606 с.
5. Флоренский П. Имена. М.: ЭКСМО-Пресс, 1998. 911 с.
6. Фрэзер Д. Золотая ветвь. М.: Изд-во полит. лит-ры, 1987. 703 с.
7. Юнг К.Г. Архетип и символ. М.: Ренессанс, 1991. 286 с.

Дуплинская Юлия Михайловна –

кандидат философских наук, доцент кафедры философии
Саратовского государственного технического университета

УДК 339.187.62:33.001.76

Е.В. Олейникова

**ЛИЗИНГ КАК ФОРМА ПОДДЕРЖКИ ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ
В РЕМОНТНОМ БИЗНЕСЕ**

Рассматривается возможность использования механизма лизинговых сделок для решения финансовых проблем в развитии ремонтного бизнеса силами предприятия-производителя оборудования. Исследуются возможные виды лизинговых операций, характеристики преимуществ лизинговой сделки для ее участников в процессе создания и при использовании услуг сервисного центра ремонтного обслуживания.

E.V. Oleynikova

**LEASING AS THE SUPPORT FORM OF INNOVATION ACTIVITY
IN AFTER SALES SERVICE BUSINESS**

The article en lights the use of the leasing deal mechanism for solving financial problems in the development of after sales service business by enterprises-manufacturers. Possible types of leasing operations advantages of leasing deals for their participants, who develop and accept services of the repair maintenance center.

Сегодня для обеспечения конкурентоспособности выпускаемой продукции предприятиям требуются не только значительные финансовые ресурсы для внедрения новейших технологий, но и квалифицированные специалисты, способные поддерживать требуемую надежность имеющегося оборудования, своевременно осуществлять его модернизацию и все виды ремонтного обслуживания. Повсеместное отставание производственной инфраструкту-

ры, и прежде всего, ремонтных служб предприятия заставляет искать инновационные пути в этой области деятельности.

Быстро и качественно решать подобные задачи возможно за счет развития сервисной ремонтной деятельности силами производителя оборудования [1]. Однако, обладая достаточным потенциалом в решении производственных задач, фирменный ремонт промышленного оборудования сегодня не может полностью реализоваться в силу наличия целого ряда проблем, особое место среди которых занимает проблема финансирования, обусловленная ограниченностью начального капитала и оборотных средств у предприятия-производителя станков, а также высокими процентами банковского кредитования. Решить эти проблемы возможно при использовании механизма лизинговых процедур. В настоящее время бесспорным является тот факт, что лизинг является одним из реальных шансов привлечь инвестиции в эту сферу деятельности, предоставляя возможность модернизировать производство, повысить конкурентоспособность отечественного станочного парка, создать новые рабочие места*. Как показывает зарубежная практика, именно малый и средний бизнес является основными лизингополучателями в условиях недостаточности собственных средств [4].

Как экономико-правовая категория и кредитно-финансовый инструмент, лизинг выражает комплекс имущественных и финансовых отношений между участниками лизинговой операции и охватывает не только договор лизинга, но и сопутствующие ему договоры – купли-продажи, займа, гарантии, страхования, оказания услуг и др. Согласно российскому законодательству, это еще и вид инвестиционной деятельности по приобретению имущества и передачи его в лизинг, поэтому лизинговые отношения в системе сервисного обслуживания и ремонта можно рассматривать как инвестиционные, действующие в треугольнике «лизингодатель (сервисный центр) – лизингополучатель (фирма, приобретающая право использовать оборудование в обмен на уплату лизинговых платежей) – продавец (производитель оборудования)», каждая из сторон которого имеет свои преимущества в лизинговой сделке (табл. 1).

Из таблицы видно, что лизинг является в современных условиях одним из эффективных способов адаптации субъектов хозяйствования к новой экономической обстановке, средством активизации любой предпринимательской деятельности, позволяет принимать решения на базе гибкого планирования, предусматривает более широкую палитру решений для лизингополучателя, чем покупка имущества. Широкое использование лизинговых операций позволяет активно обновлять основные производственные фонды и создает экономические условия для более быстрого внедрения достижений НТП в производство, сокращает затраты на капитальный ремонт морально устаревших и физически изношенных машин, оборудования и транспортных средств.

Рассматривая фирменный сервис как направление диверсификации производства, следует сказать, что в российских экономических условиях он нуждается в финансовой поддержке, и в первую очередь, на ранних стадиях своего становления – в силу ряда своих специфических особенностей:

- узкая специализация;
- ограниченность источников финансирования у предприятия-производителя оборудования;
- относительная ограниченность предложения своих функций с учетом неразвитости сферы таких услуг из-за отсутствия практики обращения предприятий;
- низкая капитализация, т.е. использование малой части доходов предприятия на расширение основного капитала.

Изучение особенностей лизинговых услуг позволяет для значительного расширения потенциала сервисной деятельности предложить оперативный лизинг, который иногда называют сервисным [2]. Такой вид лизинга предпочтителен для всех сторон исследуемого тре-

* О развитии лизинга в инвестиционной деятельности. Постановление Правительства РФ от 29 июня 1993 г. № 633.

угольника. Срок лизингового договора обычно составляет от 3 до 5 лет, что является оптимальным сроком для продуцента оборудования, так как темпы развития НТП заставляют его именно в эти сроки успевать создавать новые модели оборудования или вносить существенные элементы модернизации в выпускаемые. Одновременно именно такой срок в мировой практике является оптимальным при создании наукоемкой продукции [3]; в противном случае предприятие теряет шанс быть конкурентоспособным. Для лизингополучателя и лизингодателя это период времени, в течение которого наиболее вероятно получение стабильных показателей надежности работы оборудования, позволяющих самостоятельно применять предлагаемый метод обслуживания, предварительно проведя подготовку ремонтного персонала при помощи специалистов сервисной службы.

Таблица 1

Характеристики преимуществ лизинговой сделки для ее участников

| Преимущества лизинговой сделки | | |
|---|---|--|
| Лизингодатель (сервисный центр) | Лизингополучатель | Продавец (производитель оборудования) |
| 1. Расширяет номенклатуру услуг, с которой он выступает на внутреннем рынке 2. Снижает риск потерь в связи с неплатежеспособностью клиентов 3. Позволяет использовать налоговые и амортизационные льготы и тем самым снижать величину лизинговой ставки с целью расширения круга клиентов 4. Расширяет и укрепляет контакты с потребителями оборудования, потенциально являющегося предметом лизинга 5. Дает возможность создавать и расширять круг перманентных контрагентов, вмешиваться в процесс технического развития предприятий-потребителей, влиять на его деятельность, так как прямое вмешательство иногда невозможно и нецелесообразно 6. Придает реальность и действенность обратной связи между лизингопользователем и продавцом за счет технической поддержки оборудования | 1. Снижает риск отрицательного воздействия фактора морального и физического старения оборудования 2. Предполагает более упрощенный и дешевый по сравнению с кредитом механизм заключения сделки 3. Дает возможность непрерывного и быстрого обновления производственных мощностей, т.е. предполагает большую мобильность при инвестиционном и финансовом планировании 4. Уменьшает риски возникновения убытков при освоении новой техники 5. Предполагает 100%-е использование оборудования, не требующего немедленного начала платежей 6. Позволяет уменьшить размер налогооблагаемой прибыли за счет возможности отнесения лизинговых платежей на производственные расходы 7. Позволяет рассредоточить выплаты за приобретаемое оборудование с дополнительным пакетом услуг 8. Предпочитает использовать лизинг, а не покупку оборудо- | 1. Получает дополнительные финансовые возможности для расширения деятельности 2. Создает предпосылки для сокращения расходов на рекламу, анализ рынка, поиск потребителей и их подготовки к восприятию продукции 3. Снижает издержки по сбыту продукции 4. Увеличивает объемы продаж за счет повышения спроса на вспомогательное оборудование, инструмент, оснастку, используемые при эксплуатации объектов лизинговой сделки, осуществления сервиса и модернизации сдаваемого в лизинг оборудования 5. Снижает кредитные риски и решает проблему гарантий качества работы оборудования у потребителя за счет лизингодателя 6. Дает возможность иметь список потенциальных потребителей оборудования из-за отсутствия денежных средств или невозможности получения кредита на покупку нового оборудования |

вания неизвестной фирмы

На начальном этапе развития рынка производственных и лизинговых услуг интересам лизингодателя в наибольшей степени отвечает передача имущества в лизинг на сроки, близкие к периоду полной амортизации, т.е. финансовому лизингу, поскольку при оперативном лизинге возрастает риск лизингодателя по возмещению высокой остаточной стоимости предмета лизинга при отсутствии спроса на него. Для лизингополучателя эта форма также предпочтительна по причине более низкой платы лизинговых платежей.

Следует отметить, что деление лизинга на оперативный и финансовый с точки зрения срока действия лизинговой сделки и срока окупаемости предмета сделки чаще всего является условным, из-за отсутствия специального законодательства, регулирующего такие сделки. Оперативный лизинг предпочтителен в тех случаях, когда хозяйствующий субъект не желает нести риски по долгосрочному владению и пользованию имуществом, не уверен в своей длительной платежеспособности, не имеет средств для покупки имущества, а также профессиональной подготовки персонала и содержания надлежащего ремонтного обслуживания или хочет убедиться в правильности выбранного его направления. В зависимости от условий заключения договора лизинговой сделки по объему обслуживания передаваемого в лизинг имущества и комплексности услуг, возможно применение широкого набора лизинговых функций (табл. 2).

Таблица 2

Возможные виды лизинговых операций при использовании услуг сервисного центра ремонтного обслуживания

| Признак классификации | Содержание признака | | | |
|--|-------------------------|------------------------|--------------------|---------------------------|
| Вид лизинга | оперативный (сервисный) | | финансовый | |
| Тип имущества | новое | | подержанное | |
| Тип лизингополучателя | производственный | | | |
| Широта распространения лизинговой сделки | на все имущество | | на часть имущества | |
| Объем обслуживания имущества | чистый | с полным набором услуг | полносервисный | с частичным набором услуг |
| Характер финансирования | срочный | | возобновляемый | смешанный |
| Характер лизингового платежа | денежный | | компенсационный | |

При чистом лизинге все налоги и сборы оплачивает лизингополучатель, осуществляет сервисный ремонт и страхование, несет все расходы, сопряженные с использованием имущества, не включаемые в лизинговую плату. Полносервисный лизинг предусматривает оказание пакета услуг, связанных с проведением техобслуживания и ремонта сданного в лизинг оборудования. Лизинг с полным набором услуг предусматривает комплексную систему, включающую в себя не только техобслуживание и послегарантийный ремонт, наладку, шеф-монтажные и пусконаладочные работы, но и предоставление дополнительных услуг, таких как: подготовка производственных площадей, осуществление маркетинговых исследований, предшествующих приобретению оборудования, осуществление поставки необходимых комплектующих, предоставление квалифицированного персонала, подготовка кадров для работы на этом оборудовании и другие. Лизинг с частичным набором услуг означает, что сервисная служба выполняет лишь отдельные сервисные функции по техническому обслуживанию оборудования, обеспечивая узко определенную часть работы вовлечения в оперативно-хозяйственную деятельность лизингополучателя.

Лизинг подержанного имущества выгоден всем сторонам сделки. Лизингодатель имеет возможность получить прибыль от временно простаивающей техники, сдав ее на определенный срок в лизинг, а лизингополучателя привлекает относительно невысокая стоимость имущества (целесообразно предлагать по оценочной стоимости), особенно если сдается сложное дорогостоящее оборудование, которое предприятие не может купить в силу объективных причин финансового характера. Одновременно такие условия должны более располагать потребителей оборудования к применению сервисных услуг. Целесообразно, чтобы минимальные инвестиции в имущество со стороны лизингодателя составляли не менее 20% от стоимости имущества, передаваемого в лизинг, а период действия лизингового договора не превышал 80% срока службы имущества, как это присутствует в аналогичных сделках других стран. Покупка имущества после окончания срока действия договора может осуществляться по остаточной стоимости, определенной на момент начала действия контракта, по «нулевой» или по рыночной. Для производителей оборудования и лизингополучателя в нашей стране может быть интересен специальный лизинг, в рамках которого выполняются научно-исследовательские работы на базе лизингополучателя. В этом случае объект лизинговой сделки изготавливается с ориентацией на требования лизингополучателя, а по истечении срока лизингового договора может быть использован только самим лизингополучателем. Так, в США лизингополучатель может приобрести оборудование в том случае, если оно имеет срок службы не менее двух лет и остаточная стоимость, определяемая по рыночной цене, составляет не менее 15% от его первоначальной цены [2].

Срок действия финансового лизинга не должен составлять более 5-10 лет. Именно за этот период успевает амортизироваться вся или большая стоимость предмета лизинга, что позволяет сервисной службе за счет полученных лизинговых платежей вернуть стоимость имущества и покрыть издержки, связанные с финансированием конкретных видов оборудования. В России под финансовым лизингом (финансовой арендой) понимается такой вид лизинга, при котором лизингодатель обязуется приобрести в собственность указанное лизингополучателем имущество у определенного им продавца и передать это имущество лизингополучателю во временное владение и пользование*. За долгие годы термин «финансовый лизинг» стал весьма устойчивым, хотя было бы ошибкой считать, что он сводится только к финансовым процедурам. Безусловно, он несет в себе финансовую функцию, обеспечивая вложения средств в основные фонды и увеличивая оборотный капитал лизингополучателя. Этому способствует широкое участие банковского капитала, что привело к тому, что условия этого вида лизинга с финансовой точки зрения мало отличаются от условий банковского кредитования.

Учитывая, что в российской экономике еще не сложилась развитая и конкурентоспособная инфраструктура лизинговых услуг и практически нет компаний, которые смогли бы обеспечить должное техническое обслуживание объектов лизинга из-за отсутствия в их структуре специализированных ремонтных служб, эту функцию целесообразно «разделить» между фирмой-производителем оборудования и ее сервисным центром. В определенной степени налицо косвенный лизинг, в котором передача имущества в лизинг происходит через посредника, в качестве которого выступает сервисный центр. Для проведения операций фирма-изготовитель оборудования совместно с банком берет на себя организационную проработку проектов, решение административных вопросов, оказание консультационных услуг финансового характера, а сервисная служба берет на себя поиск предприятий по техническому обслуживанию оборудования и клиентов для предоставления предметов производства в лизинг (см. рисунок).

Включение посредника в лизинговые операции способствует более эффективной деятельности производителей, позволяет им сосредоточиться на самом процессе производства, имея возможность через сервисные центры получать всю необходимую достоверную информацию с мест, где оно установлено, что существенно сокращает срок оборачиваемости

* Федеральный закон РФ «О лизинге» от 29.10. 1998 г. № 164-ФЗ (с изм. и доп. от 2002 г.).

капитала и обеспечивает повышение доходности производства. Выполняя роль посредника в осуществлении лизинговых операций, сервисный центр берет на себя при передаче имущества в лизинг все или часть обязанностей, связанных с услугами нефинансового характера: техническое обслуживание и ремонт техники, передаваемой в лизинг, страхование объектов лизинга, консультации лизингополучателю в отношении эксплуатации оборудования. Распространяя преимущественно оборудование предприятия-производителя, сервисный центр в этом случае является узкоспециализированной лизинговой компанией, ориентированной на узкий сегмент рынка (один или несколько видов оборудования определенной группы, выпускаемых головным предприятием). Эти центры должны располагать собственным парком или запасом оборудования и предоставлять его лизингополучателю по заявке. Преимущество заключения лизинговой сделки для лизингополучателя состоит еще и в том, что лизингодатель в таком случае связан партнерскими отношениями с производителем этого оборудования. Это позволяет снижать цену на предмет лизинга. В любом случае в договоре лизинга должны быть согласованы периодичность, размер и способ оплаты лизинговых платежей с учетом возможного пересмотра стоимости основных фондов.

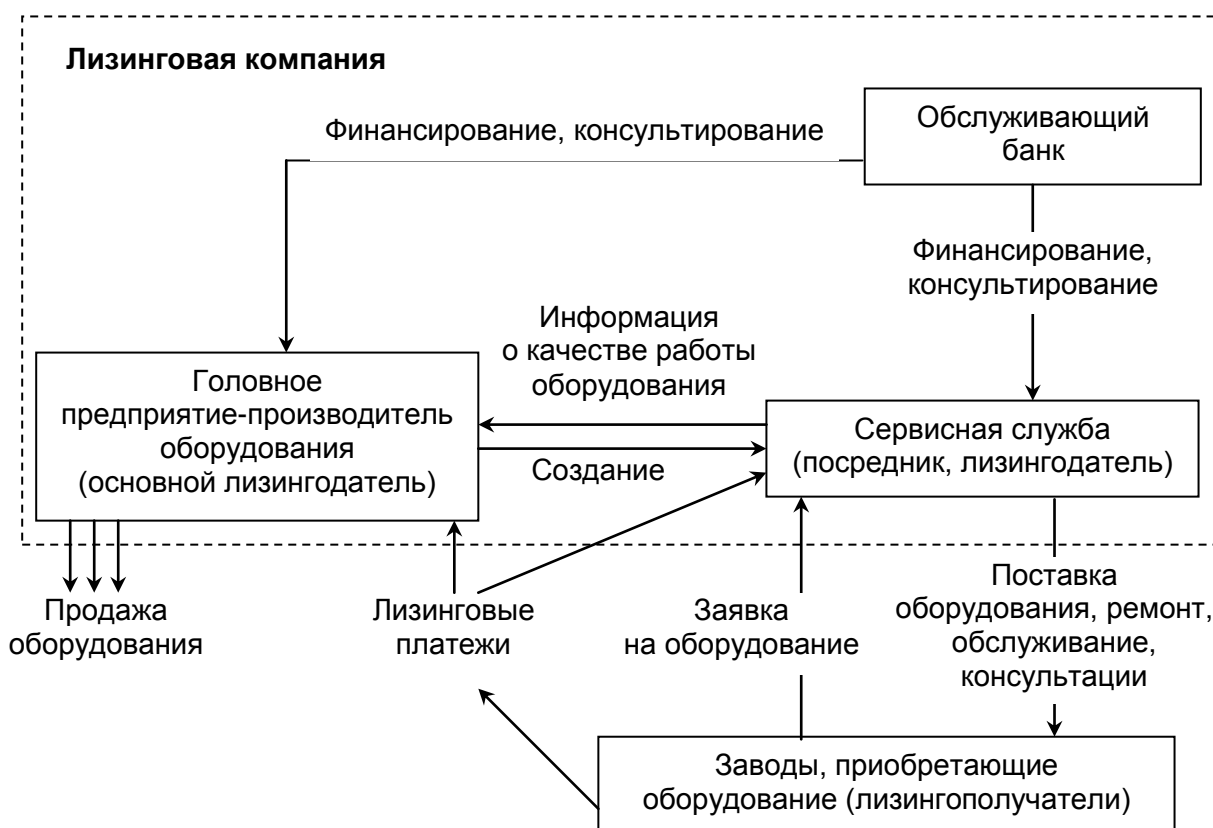


Схема сервисной лизинговой сделки

Важным условием развития рынка лизинговых услуг является участие банка в осуществлении лизинговых операций, что позволяет решить многие проблемы производителя. Учитывая неразвитость рынка лизинговых услуг и отсутствие практического опыта по осуществлению таких операций, банк на первых порах будет выступать в роли кредитора лизингодателя и являть собой гаранта таких сделок для лизингополучателя. К тому же, начинающие свой бизнес «с нуля» предприятия, нуждающиеся в сервисных услугах, не могут предоставить лизингодателю всю финансовую информацию (например, балансы) за предшествующий период своей деятельности, поэтому обеспечение лизинговой сделки должно идти че-

рез банковскую гарантию. В силу неразвитости рыночных отношений, отсутствия вторичного рынка оборудования, неэффективного возврата собственности, привлечение банка необходимо для расширения имущественной поддержки сервисных центров.

Другой его важной функцией должно стать вложение средств в материальную базу клиента, что позволит ему не только установить с предприятием взаимовыгодные отношения, но и за счет формирования стратегического плана развития предприятия получить в будущем в его лице конкурентоспособного и платежеспособного клиента. Преимущества участия банков в осуществлении лизинговой деятельности вытекают из уровня развития банковского сектора в экономике страны. Это дает ему реальное материальное обеспечение лизинговых операций в виде движимого и недвижимого имущества, позволяет занять соответствующую нишу на рынке банковских услуг, развить сеть собственных финансовых лизинговых компаний и круг выполняемых ими операций, занимающихся финансированием лизинговых операций, расширить сферу влияния в регионе.

Механизм функционирования лизинговой компании предполагает анализ потока денежных средств и финансовое прогнозирование. Важной составляющей в данном случае является лизинговая плата, при которой достигается максимальная экономическая эффективность использования лизинга в сервисном центре. Как экономическая форма реализации права собственности, возникающая между собственником предмета лизинга, пользователем и владельцем, лизинговая плата опосредует распределение дохода, созданного в процессе использования оборудования, и обеспечивает процесс возмещения стоимости всем участникам лизинговой сделки, накопление капитала и стимулирование этого вида деятельности.

При расчете выплат по лизингу необходимо учитывать ряд экономических факторов: стоимость оборудования, срок лизингового договора, остаточную стоимость имущества, нормы и порядок начисления амортизации, процентную ставку финансирования. Все перечисленное относится к факторам прямого ценового действия, которые непосредственно составляют статьи расходов лизингодателя. К факторам косвенного воздействия относятся степень риска морального старения техники, колебания рыночных цен на услуги производственного характера, изменение транспортных тарифов, платежеспособность лизингополучателя, наличие конкуренции на рынке услуг. Необходимо также учитывать такие психологические факторы как степень восприимчивости и уровень восприятия и желание потребителей оборудования воспользоваться предлагаемым набором услуг. Для оценки спроса (C) на сервисные услуги ремонта и лизинга и возможного развития сети услуг может быть использована формула:

$$C = \sum n_i a_i (1/b) p ,$$

где n_i – число предприятий – потенциальных потребителей конкретных видов оборудования, выпускаемых данным производителем в определенном географическом регионе; a_i – коэффициент, учитывающий доходы каждой потребительской группы и величины доли доходов, которая может быть направлена на приобретение предлагаемых видов услуг; b – средний срок службы оборудования; p – вероятность приобретения предлагаемого пакета услуг.

Критериями участия предприятий в сервисном проекте могут быть соответствие лизинговых платежей доступной ставке кредитования для каждого клиента индивидуально, величина риска потерь вложения средств в приобретение оборудования без надлежащего контроля со стороны фирмы-производителя, соответствие видов предлагаемых услуг стратегическим целям и задачам потребителей оборудования и другие.

Основой критериев должна быть максимально полная оценка рисков. Прогнозирование, оценка и управление рисками – важная часть любой инновационно-инвестиционной деятельности. Еще на этапе создания сервисного центра головному предприятию желательно провести экспертизу по выявлению рисков, возникающих в связи с осуществлением такого проекта, способов их учета, контроля и оценки. С учетом природы производственных услуг

все риски можно объединить в следующие группы: имущественные, финансовые, организационные, технические, форс-мажорные.

Страховая защита участников проекта по каждому виду рисков должна обеспечиваться классическими видами страхования, гарантирующими компенсацию потерпевшей стороне ее убытков. Актуальность учета и оценки рисков связана с тем, что это не только самозащита имущества и финансов в новом развивающемся бизнесе, но и возможность защиты от объективных событий в процессе воспроизводства, от неблагоприятного, непредсказуемого изменения конъюнктуры рынка и ухудшения других условий макроэкономической среды. Поэтому необходим механизм уменьшения, передачи и распределения рисков между участниками проекта сервисной деятельности.

Для осуществления таких проектов определяющее значение имеют гарантии банка, которые в каждом конкретном случае могут иметь различные форму и объем – в зависимости от качественных и количественных характеристик оценки имущества, видов обслуживания, устойчивости деловых связей, качества оформления договоров, репутации каждого участника лизинговой компании, круга контрагентов при проведении сервисно-ремонтных работ и другие.

Правильный учет всех этих факторов и составляющих стоимости сервисных услуг и лизинговых платежей в конечном итоге будет определять конкурентоспособность сервисного центра. Подобная совместная работа позволяет соединить ноу-хау производителя продукции, сервисной службы, выступающей в роли лизингодателя, расширить функции банка, решить текущие проблемы лизингополучателя по выпуску качественной продукции и повышению эффективности производства. Эффективность деятельности процедур, охваченных лизинговой сделкой, обеспечивается тем, что весь механизм функционирования – технический, финансовый и организационный – подчинен решению важнейших задач – осуществлению выпуска качественной продукции и повышению конкурентоспособности отечественного станкостроения. Здесь, по сути, используется производственная функция лизинга, позволяющая форсировать сбыт наиболее передовой техники, проводить техническое обслуживание и ремонт непосредственно у потребителя, получать экономическую выгоду от лизинга продукции и использовать ее на расширение и техническую реконструкцию предприятия-изготовителя оборудования. Одновременно присутствует маркетинговая форма проявления сущности лизинговых сделок. Диверсифицируя маркетинговую деятельность через осуществление лизинговых операций, производитель расширяет рынок сбыта своей продукции и стремится к финансовой стабилизации основного производства.

Таким образом, для развития и становления сервисной деятельности лизинг является важной составной частью финансового рынка. Предприятию, заключившему контракт на фирменное обслуживание своего оборудования, использование лизинговой формы целесообразно по причинам низкой залогоспособности физически изношенного и морально устаревшего оборудования. При отсутствии достаточных финансовых ресурсов и ограничении возможности расширения и обновления производства, заключение лизингового договора позволяет снизить производственные риски самостоятельного внедрения новой техники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кулибанова В.В. Маркетинг: сервисная деятельность. СПб.: Питер, 2000. 240 с.
2. Макеева В.Г. Лизинг: Учеб. пособие. М.: ИНФРА-М, 2003. 192 с.
3. Твисс Б. Управление научно-техническими нововведениями. М.: Экономика, 1989. 271 с.
4. Чекмарев Е.И. Лизинговый бизнес. М.: Экономика, 1993. 116 с.

Олейникова Елена Васильевна –

кандидат технических наук, доцент,

докторант кафедры «Экономика и управление в машиностроении»
Саратовского государственного технического университета

ЮБИЛЕИ

АЛЬБЕРТ МАРКОВИЧ КАЦ (к 70-летию со дня рождения)



В 1975 году на заведование кафедрой технической физики, созданной на базе ПМК общеобразовательных дисциплин, был приглашен самый молодой тогда в Саратове доктор физико-математических наук Альберт Кац, научный сотрудник НИИ «Волна» (сегодня НПО «Алмаз»), возглавлявший научную лабораторию теоретического отдела НИИ, где велись исследования в области СВЧ-электроники – процветавшем в то время научном направлении, обеспечившем практическое создание в СССР СВЧ-приборов для военной и аэрокосмической техники, спутниковой связи и телевидения. Условия жесткой производственной дисциплины отраслевого НИИ, где формировался А.М. Кац как руководитель, его высокая ответственность как черта характера и четкое понимание требований, предъявляемых к квалификации выпускников вуза, приходящих в наукоемкие отрасли промышленности, позволили ему в очень короткий срок сформировать эффективный и профессиональный коллектив преподавателей и со-

трудников кафедры, особенностью которой являлось в тот момент объединение в рамках ее компетентности почти всех дисциплин естественно-научного цикла инженерных специальностей – физики, математики, теоретической механики, вычислительной техники, электротехники и электроники, программирования.

С приходом А. Каца на кафедру был занесен «вирус» здорового, я бы даже сказал, какого-то «мальчишеского» азарта научного творчества, поразивший почти всех опытных преподавателей и молодых выпускников физфака и мехмата университета.

Для этого периода развития нашей страны характерно было активное участие вузовской науки в разнообразных формах научной работы – прямые и контрагентские хозяйственные НИР в оборонных и других отраслях, различные научные программы Минвуза СССР, АН СССР, договоры о сотрудничестве с НИИ и предприятиями и т.п. И кафедра активно это делала.

За время до начала реформ в СССР кафедра выполнила около двух десятков хозяйственных и госбюджетных работ (последняя НИР была сделана в 1987 г.) и договоров о сотрудничестве с такими предприятиями как НИИ «Волна», завод «Контакт», НПО «Сигнал», НИИ «Исток» (г. Фрязино), НИИ-24 (г. Мытищи), НИИ радиоприборостроения (г. Новосибирск), НИИ общего машиностроения (г. Москва), НИИ высшей школы (г. Москва), НИИ «Титан» (г. Москва).

За это время сотрудники кафедры приняли участие в огромном количестве всесоюзных и отраслевых конференций, что было замечательной рабочей и деловой традицией, вызывавшей сильнейшую мотивацию к научной работе. Было опубликовано в общей сложности

сти более 200 научных работ, что, безусловно, способствовало быстрому росту научной квалификации, так важной для преподавателя кафедры естественно-научных дисциплин.

Характерной чертой профессора А. Каца являлось и является сегодня терпимое, доброжелательное и всегда поддерживающее отношение к разноплановым научным и творческим инициативам сотрудников, подчас вовсе не связанным с его «родовым» научным направлением, принесенным из отраслевого НИИ. Для того времени это было многим несвойственно. Но этот научный либерализм дал свои результаты – многие из «той команды» удовлетворили научные амбиции в направлениях своих научных предпочтений: А.П. Терехин – д.ф.-м.н. (теория функций), В.В. Кузнецов – д.т.н. (механика твердого тела), Н.Н. Макеев – д.ф.-м.н. (теоретическая механика), В.Ю. Ольшанский – д.ф.-м.н. (механика летательных аппаратов), Ю.В. Морковкин – к.ф.-м.н. (аэрогидродинамика), В.М. Картамышев – к.т.н. (СВЧ-электроника), А.И. Безруков – к.э.н. (экономика?!), М.Н. Давидович – к.ф.-м.н. (радиофизика), Ю.В. Клинаев – д.ф.-м.н. (математическое моделирование в физике и электронике). Это и красноречивый критерий эффективности работы руководителя кафедры вуза – подготовка высококвалифицированных преподавателей, что дало и «побочный» положительный эффект – в 1992 году из состава кафедры была выделена, в самостоятельную, кафедра высшей математики и механики.

А дальше – больше, но это уже не прошлое, а настоящее – выросший из «недр» кафедры и оставшийся под её научно-методическим руководством прекрасно оснащенный ИВЦ института, открытие специальности ПВС (1997 г.), а с этим – преобразование кафедры в выпускающую и новые задачи перед коллективом кафедры и её руководителем.

Но профессор Альберт Кац по-прежнему бодр (и как и прежде не злонамерен) духом и молод душой. Мы ему желаем здоровья и успехов в благородной деятельности по воспитанию и подготовке инженерных кадров.

От кафедры
«Техническая физика и информационные технологии»
Энгельсского технологического института СГТУ,
д.ф.-м.н., профессор

Ю.В. Клинаев

ВЛАДИЛЕН ВАСИЛЬЕВИЧ ПЕТРОВ
(к 70-летию со дня рождения)



13 марта 2005 г. отмечается *70-летие* Владилена Васильевича Петрова, действительного члена Российской Академии архитектуры и строительных наук, доктора технических наук, профессора, Заслуженного деятеля науки и техники Российской Федерации, Почетного строителя РФ, заведующего кафедрой «Механика деформируемого твердого тела и прикладная информатика» СГТУ.

Всегда интересен вопрос о начале увлеченности наукой создателей научных школ. Третьекурснику строительного факультета МИСИ В.В. Петрову понравилась творческая атмосфера в научном кружке кафедры «Строительная механика» МИСИ – и выбор был сделан. На третьем курсе посчастливилось учиться на потоке, где строительную механику преподавал ученик члена-корреспондента Академии наук СССР, дважды лауреата Сталинской премии Василия Захаровича Власова, ныне член-корреспондент РААСН профессор Н.Н. Леонтьев.

Представьте, десятки страниц заняли вычисления в НИРС, посвященной расчету скошенных и трапециевидных пластинок, но в начале вычислений ошибка. Обычно говорят, что на ошибках учатся, но главным для В.В.Петрова было то, что его бойцовский характер позволил преодолеть это затруднение, и все встретившиеся в дальнейшем тернии. За коллективную НИРС, выполненную учениками В.З. Власова В.В. Петровым, Д.Н. Соболевым (ныне доктором наук, профессором) и Э.Н. Кузнецовым (ныне доктором наук, профессором, преподающим в одном из университетов США), на Всесоюзном смотре-конкурсе НИРС студенты МИСИ получили первую премию и Почетную грамоту Министерства высшего и среднего специального образования СССР. Показательно, что все последующие НИРС студента В.В. Петрова также премиривались.

Выпускник Московского инженерно-строительного института 1957 г., а затем аспирантуры этого ведущего вуза страны, В.В.Петров сформировался как талантливый ученый, продолжатель высоких научных традиций своего учителя и научного руководителя члена-корреспондента АН СССР В.З. Власова, к которому наш юбиляр навсегда сохранил в душе благодарную память, и посвятил себя созданию и развитию в Саратове научной школы нелинейной строительной механики тонкостенных пространственных систем.

Первым серьезным итогом научной работы В.В. Петрова явилась защита кандидатской диссертации «Некоторые вопросы расчета пологих оболочек при конечных прогибах», осуществленная в 1961 г. в Московском авиационном институте. Ученый совет в то время возглавлял специалист, которого долгие годы вынужденно называли просто «Главным конструктором космических аппаратов», а в Ученый совет диссертацию рекомендовала кафедра, возглавляемая академиком АН СССР И.Ф. Образцовым, который впоследствии продолжительное время был министром образования Российской Федерации. В диссертации для расчета гибких пологих оболочек впервые был применен метод последовательных нагружений, послуживший в дальнейшем основой для ряда предложенных В.В. Петровым инкременталь-

ных методов пошаговой линеаризации исходных дифференциальных уравнений в частных производных, и доказавший свою несомненную практическую ценность для решения большого класса задач нелинейной строительной механики.

На протяжении 1961-1969 гг. в СПИ закладывались основы будущей научной школы нелинейной механики тонкостенных пространственных конструкций. Под руководством В.В.Петрова защитили кандидатские диссертации его ученики: В.А. Крысько, И.В. Неверова, В.Н. Филатов. Однако недаром сказано, что «покой нам только снится». Традиционный линейный подход к расчету элементов строительных конструкций поддерживался авторитетом и положением крупных ученых и «пробивание» новых прогрессивных идей требовало недюжинного упорства и, если угодно, бесстрашия. Время все расставило по своим местам, но 60-е годы были для В.В. Петрова и становления его научной школы определяющими.

В 1969 г. В.В. Петров становится во главе вновь созданной в СПИ кафедры «Строительная механика и теория упругости» и менее чем за год завершает подготовку к защите диссертации на степень доктора технических наук «Метод последовательных нагружений в нелинейной теории пластинок и оболочек». В это время ему было 35 лет.

13 июня 1970 г. В.В. Петров блестяще защищает диссертацию в МИСИ, что позволило ему проявлять себя в качестве не только выдающегося ученого, но и великолепного организатора науки. В тот период были защищены кандидатские диссертации учениками В.В. Петрова: В.В. Карповым, И.Г. Овчинниковым, Л.С. Яковлевой, В.В. Неверовым, Е.Н. Деревянкиной.

Начало научной работы учеников Владилена Васильевича Петрова проходило не только через участие в аспирантских семинарах кафедры СМиТУ. Е.Н. Деревянкина и И.В. Кривошеин обучались на специальности ПГС по индивидуальным планам, разработанным и «продвинутым» В.В. Петровым через строительный факультет СПИ и включавшим важные дополнительные разделы нелинейной механики деформируемого твердого тела.

Сформулированная В.В. Петровым программа действий заключалась в его словах: «Решить уравнение – этого мало. Надо увидеть, где можно применить полученные результаты». Она послужила лейтмотивом создания и развития научно-исследовательской лаборатории при кафедре СМиТУ, которой долгие годы руководил отличный экспериментатор и крайне дотошный и болеющий за порученное ему дело Ю.С. Золотницкий.

Известно, что ученые с «большой буквы» всегда тонко чувствуют не только необходимость обновления научной тематики, но и потребности современного производства. С 1976 года на кафедре СМиТУ под руководством В.В. Петрова активно разрабатываются теоретические основы расчета конструкций в условиях действия агрессивных сред. Была разработана теория накопления рассеянных повреждений и теория наведенной неоднородности, явившиеся теоретической основой множества хоздоговорных и финансируемых из госбюджета исследований, выполненных кафедрой СМиТУ, лабораторией Ю.С. Золотницкого и научной группой в составе В.К. Иноземцева, Н.Ф. Синевой, А.Ф. Макеева и В.М. Кожеватовой на многих предприятиях хмпроизводства в различных регионах страны.

Энергичная и целеустремленная деятельность В.В. Петрова по организации научных исследований была востребована: в 1977 г. последовало назначение В.В. Петрова проректором СПИ по научной работе. На данной должности в полной мере были проявлены все лучшие его качества как крупного руководителя: за период с 1977 по 1988 годы объемы научных исследований в СПИ многократно увеличились, на основе использования теоретических разработок ученых вуза были решены многие актуальные народнохозяйственные проблемы.

В новый качественный этап вошел и процесс подготовки кадров высшей квалификации: ученики В.В. Петрова В.А. Крысько, В.В. Неверов, И.Г. Овчинников, В.В. Карпов успешно защитили докторские диссертации. За время данного периода творческой деятельности Владилена Васильевича Петрова ряды подготовленных им кандидатов наук пополнили

работающие на кафедре МПИ И.В. Кривошеин, О.Р. Кузнецов, П.К. Семенов, а также В.К. Иноземцев и Н.Ф. Синева, возглавляющие ныне кафедры СГТУ.

В стране начались «перестройка, гласность, ускорение». Новое время требовало энергичных руководителей «новой волны». «В вуз приходят за знаниями и необходимо создать все условия для полного развития способностей студентов» – вот кредо В.В. Петрова, с которым он шел в качестве одного из кандидатов на выборы нового ректора СПИ. В истории Саратова это были первые выборы ректора. На заседании Ученого совета института восторжествовали сформулированные Владиленом Васильевичем Петровым задачи вуза на предстоящие пять лет, и В.В. Петровым была с большим преимуществом одержана победа над оппонентами.

Если кто-то считает сладким «ректорский хлеб», то он многого не понимает. За время пребывания В.В. Петрова на этом посту в стране происходили радикальные изменения. СПИ отнюдь не был изолирован от многих зачастую разрушительных процессов. Уже в начале руководства страной М.С. Горбачевым студентов дневной формы обучения стали без учета успеваемости призывать в армию. В 1992 г. в стране началась галопирующая инфляция, и профессорско-преподавательский состав вуза разыгрывал в лотерею носки, ботинки и куртки-ветровки. Но программа, предложенная В.В. Петровым в 1988 г., работала. Не работал первый президентский указ Б.Н. Ельцина об уровне оплаты труда работников Высшей школы, но вуз шел вперед «через тернии к звездам». В этот период в руководстве СПИ сложилась энергичная работоспособная команда в составе ректора В.В. Петрова, первого проректора Ю.В. Чеботаревского, проректоров В.Р. Атояна, Ю.С. Архангельского и А.А. Захарова.

Логическим завершением мечты В.В. Петрова и одного из этапов развития вуза стало присвоение СПИ в 1992 г. статуса государственного технического университета, открытие гуманитарных специальностей, создание учебно-исследовательских центров механики и математики и физики, химии и экологии. Ректор верил, что общество обязательно организуется и отведет должное место науке и вселял свою уверенность в коллектив СГТУ.

Рабочий день ректора всегда заполнен до отказа – все подразделения вуза требуют неослабного внимания. Но если Совет ректоров избрал тебя своим председателем, то надо находить время и на исполнение этих обязанностей. А создание Саратовской торгово-промышленной палаты, в числе учредителей которой Вы найдете фамилию В.В. Петрова! Кажется, что времени больше не хватит ни на что, но в течение почти двух десятков лет приходилось изыскивать время и на руководство Саратовским Обществом охраны памятников истории и культуры.

Зачастую бывает так: слабых испытания ломают, а сильных заставляют ставить и решать трудные задачи. В начале 90-х годов завершили докторские диссертации и успешно защитили их ученики В.В. Петрова В.В. Кузнецов и В.К. Иноземцев, а в 1996 г. состоялись защиты докторских диссертаций Н.Ф. Синевой и Е.Н. Деревянкиной (Артамоновой). Продуктивно заработали и научные школы учеников В.В. Петрова В.А. Крысько, И.Г. Овчинникова, В.В. Кузнецова, готовившие для ряда кафедр СГТУ кадры высшей квалификации. В 2001 г. в возрасте 34 лет успешно защитил докторскую диссертацию докторант В.В. Петрова Д.К. Андрейченко. Это девятый доктор наук, подготовленный В.В. Петровым, а число кандидатов наук исчисляется многими десятками.

Признанием больших научных заслуг ректора СГТУ В.В. Петрова стало членство в пяти академиях, однако, академические мантии не изменили отзывчивости, доступности и доброты юбиляра. Ярким показателем человечности академика В.В. Петрова всегда были забота о нуждах сотрудников СГТУ и готовность брать на себя ответственность за принимаемые решения, включая и сулящие ему лично неприятности.

Юбиляр всегда с большой теплотой и гордостью говорит о своих учениках, решающих сложные современные проблемы нелинейной строительной механики. С каждым из них В.В. Петрова связывают не только научное сотрудничество, но и теплые человеческие отно-

шения, что особенно важно в современное чрезмерно рационалистичное время. Практически все ученики обязаны В.В. Петрову подсказками по ключевым моментам диссертационных работ, и всегда научный руководитель (или научный консультант) не ставил это себе в заслугу, но просто радовался очередному достигнутому под его руководством успеху.

Забота В.В. Петрова об укреплении прочностного цикла дисциплин выразилась в проведенном в 1997 г. объединении кафедр МПИ и «Соппротивление материалов», что позволило создать в СГТУ единую прочностную кафедру, а заодно усилить руководство и укрепить научными кадрами кафедру «Мосты и транспортные сооружения».

Новый этап в жизни В.В. Петрова связан с созданием им в СГТУ Высшей школы бизнеса и назначением его в 1998 г., после ухода с поста ректора, ее директором (ныне ИБиДА СГТУ). Зачастую бывает, что крупные ученые знают очень много в своей конкретной научной области и не знают очень многого в иных областях знания. Но оказалось, что и в этой области деятельности юбиляр проявил чрезвычайный интерес к тому новому, что несет в процесс построения структур управления развитие менеджмента различного уровня. Скептики в настоящее время полностью лишены аргументов: В.В. Петровым за семь последних лет изданы девять монографий и учебных пособий по различным разделам менеджмента. В.В. Петровым была разработана признанная в России программа МВА (Магистр делового администрирования), а наш юбиляр становится ее научным руководителем.

Зачастую бывает так, что специалистам с гуманитарным и техническим образованием трудно понять друг друга не только в силу использования множества специальных терминов, но и ввиду принципиально различной ментальности подходов. В.В. Петров наглядно продемонстрировал в своих изданиях по менеджменту возможность и необходимость изложения материала правильным русским языком, который понимают студенты и который является непреходящей ценностью страны, в которой мы живем.

Что еще можно сказать о профессоре, одновременно руководящем аспирантами по столь разным специальностям как «Строительная механика» и «Управление инновациями и инвестициями»? Наверное, только хорошее и доброе, включая пожелание, чтобы сил на данный научный подвиг хватало всегда. Подтверждением наличия у юбиляра запаса творческих сил является увлеченная и продуктивная работа в академии, включающая его деятельность в качестве члена Ученого совета РААСН и руководителя организованного им Саратовского представительства РААСН. Одновременно он руководит и Поволжским региональным отделением Академии транспорта РФ.

Если при чтении предыдущего текста создалось впечатление о Владилене Васильевиче Петрове исключительно как о научном муже, то это могут опровергнуть супруга академика Светлана Васильевна Петрова, значительно лучше остальных знающая юбиляра со времен «аспирант МИСИ В. Петров – студентка МИСИ С. Петрова», их сын кандидат наук Дмитрий Петров и их внук Вадим Петров, творческому воспитанию которого любящие, но строгие бабушка и дедушка уделяют в течение последних шестнадцати лет неослабное внимание. Да и поучиться у деда есть чему: творческие интересы Владилена Васильевича чрезвычайно разнообразны и во всем чувствуется стремление к совершенству.

Иначе и быть не может: поколение, к которому принадлежит юбиляр, родилось до Второй мировой войны и не несет в себе генов ужаса и усталости. Много всего и трудного, и радостного досталось поколению В.В. Петрова, но его представители обладают негибкой стойкостью и верностью выбранному жизненному курсу. Они и приходили на весьма высокие посты и уходили с них, имея в наличии все те же издаваемые виды «Жигули» и те же скромные деревянные дачи. Воистину сказано: «Не собирайте себе сокровищ на Земле...». Истинные ценности не продаются за деньги, они из другого Духовного пространства, о котором знают некоторые и которого достигают единицы.

Студенты специальностей «Промышленное и гражданское строительство», «Мосты и транспортные тоннели», «Социально-культурный сервис и туризм» на лекциях В.В. Петрова

сидят удивительно тихо. И это не только потому, что они изучают «Теорию упругости и пластичности» или «Менеджмент» с заботливой помощью увлеченного Педагога. Существует у В.В.Петрова особое поле, название которому придумали древние индийские мудрецы. Вот и идут к спокойному, интеллигентному, хорошему Человеку как к источнику мудрости и силы – ведь юбиляр всегда говорил и говорит проходящим: «У Вас должно получиться!».

Так пожелаем В.В. Петрову в его *70-летие*: «Пусть у Вас, дорогой Владилен Васильевич, все получается. Ведь если Дух молод, то и годы не беда! Здоровья Вам крепкого и радости свершений. Вы посвятили этому все прожитые годы, так пусть их будет столько, сколько у Вас публикаций, пособий, монографий и учеников – докторов и кандидатов наук!».

Идут чередой победные годы,
Наполнились силой научные всходы,
История Школы – в Скрижалях глава,
Да здравствует шеф – головам Голова!

Коллектив кафедры
«Механика деформируемого твердого тела
и прикладная информатика»

**ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ,
ПРЕДСТАВЛЯЕМЫХ В РЕДАКЦИЮ ЖУРНАЛА
«ВЕСТНИК СГТУ»**

1. Статья должна быть тщательно отредактирована и представлена в одном экземпляре, распечатанном через 1 интервал на белой бумаге форматом А4, поля: верхнее, нижнее, левое, правое – 2,0 см; ориентация книжная; шрифт Times New Roman, высота 12. Одновременно текст статьи представляется на дискете (1,44 Мбайт) в формате текстового редактора «MS Word 97» или по электронной почте vestnik@sstu.ru.

2. Статья должна обосновывать актуальность темы, отражать теоретические и (или) экспериментальные результаты и содержать четкие выводы.

3. В начале статьи в левом верхнем углу ставится индекс УДК. Далее на первой странице данные идут в такой последовательности:

- инициалы и фамилии авторов;
- полное название статьи (шрифт жирный, буквы прописные);
- краткая (5-7 строк) аннотация (курсив).

Далее авторы, название статьи и аннотация повторяются на английском языке.

Затем идет текст самой статьи и литература.

Статья завершается сведениями об авторах: ф.и.о. (полностью), ученая степень, ученое звание, место работы (полностью), должность, контактные телефоны.

4. Объем статьи не должен превышать 10 страниц текста, может содержать не более 5 рисунков или фотографий; объем обзора – 25 страниц, 10 рисунков; объем краткого сообщения – не более 3 страниц, 2 рисунков.

Иллюстрации (рисунки, графики) должны быть расположены в тексте статьи и выполнены в одном из графических редакторов (формат tif, pcc, jpg, pcd, msp, dib, cdr, cgm, eps, wmf). Допускается также создание и представление графиков при помощи табличных процессоров «Excel», «Quattro Pro», «MS Graph». Каждый рисунок должен иметь номер и подпись. Рисунки и фотографии должны иметь контрастное изображение.

Таблицы располагаются непосредственно в тексте статьи. Каждая таблица должна иметь номер и заголовок.

5. Формулы и буквенные обозначения величин должны быть набраны в редакторе формул MS Word Microsoft Equation. Каждая формула должна иметь номер.

6. Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ). Не следует употреблять сокращенных слов, кроме общепринятых (т.е., и т.д., и т.п.). Допускается введение предварительно расшифрованных сокращений.

7. Список литературы должен быть оформлен по ГОСТ 7.1-84 и включать: фамилию и инициалы автора, название статьи, название журнала, том, год, номер или выпуск, страницы, а для книг – фамилии и инициалы авторов, точное название книги, место издания (город), издательство, год издания, количество страниц.

8. К статье прилагается экспертное заключение.

9. Рукописи статей представляются в редакцию с рецензией ведущего ученого кафедры.

10. Редакция оставляет за собой право производить редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи.

11. Статьи, не отвечающие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются, рукописи и дискеты авторам не возвращаются. Датой поступления рукописи считается день получения редакцией окончательного текста.