

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный технический университет»
(ТвГТУ)

**ВЕСТНИК
ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Серия «Технические науки»

**Научный рецензируемый журнал
№ 4 (4), 2019**

Тверь 2019

Редакционная коллегия

Главный редактор А.Н. Болотов, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой ТвГТУ

Члены редакционной коллегии:

В.В. Измайлов, д-р техн. наук, профессор ТвГТУ, зам. главного редактора по направлению «Машиностроение и машиноведение»

А.Л. Яблонев, д-р техн. наук, доцент, зав. кафедрой ТвГТУ, зам. главного редактора по направлению «Транспортное, горное и строительное машиностроение»

Г.Б. Бурдо, д-р техн. наук, доцент, зав. кафедрой ТвГТУ, зам. главного редактора по направлению «Информатика, вычислительная техника и управление»

Л.Е. Афанасьева, канд. физ.-мат. наук, доцент ТвГТУ, ответственный секретарь

Н.И. Березовский, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой БНТУ, Республика Беларусь

П.Н. Богданович, д-р техн. наук, профессор БелГУТ, Республика Беларусь

И.С. Гершман, д-р техн. наук, профессор, ведущий специалист ВНИИЖТ

В.В. Голенков, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой БГУИР, Республика Беларусь

К.А. Головин, д-р техн. наук, доцент, зав. кафедрой ТулГУ

И.В. Горлов, д-р техн. наук, профессор ТвГТУ

В.И. Гульяев, д-р техн. наук, доцент, зав. кафедрой ТвГТУ

Б.Ф. Зюзин, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой ТвГТУ

Л.И. Кантович, д-р техн. наук, профессор, профессор НИТУ «МИСиС»

А.М. Керопян, д-р техн. наук, профессор НИТУ «МИСиС»

Л.В. Козырева, д-р техн. наук, доцент ТвГТУ

А.В. Кондратьев, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой ТвГТУ

Б.И. Марголис, д-р техн. наук, доцент, зав. кафедрой ТвГТУ

В.В. Мешков, д-р техн. наук, профессор, декан ТвГТУ

А.В. Михайлов, д-р техн. наук, профессор СПГУ

М.В. Новоселова, канд. техн. наук, доцент ТвГТУ

Б.В. Палюх, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой ТвГТУ

Н.А. Семенов, д-р техн. наук, профессор ТвГТУ

И.А. Солдатенков, д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник ИПМех РАН

П.В. Цибуленко, канд. техн. наук, доцент, декан БНТУ, Республика Беларусь

В.С. Шоркин, д-р физ.-мат. наук, профессор ОГУ имени И.С. Тургенева

Л.Ш. Шустер, д-р техн. наук, профессор УГАТУ

Адрес редакции: 170026, г. Тверь, наб. Афанасия Никитина, д. 22.

E-mail: vestnik_tstu_tekh@mail.ru

Учредитель: ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет».

Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки» публикует научные статьи и краткие обзоры по направлениям: 05.02.00 Машиностроение и машиноведение, 05.05.00 Транспортное, горное и строительное машиностроение, 05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление. Журнал издается с января 2019 года, выходит 4 раза в год.

Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Регистрационный номер: серия Эл № ФС77-74961 от 25 января 2019 года. Индексируется в базе данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

Перепечатка материалов из журнала возможна при письменном согласии с редакцией, при этом ссылка на журнал обязательна.

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

<i>Измайлов В.В., Новоселова М.В.</i> О ДМТ-модели дискретного адгезионного контакта.....	5
<i>Барчуков Д.А., Цыгвинцев А.В., Афанасьева Л.Е.</i> Особенности формирования структуры и свойств быстрорежущей стали при импульсно-дуговой наплавке.....	16
<i>Дунаев А.В., Тришкин И.Б.</i> Повышение ресурса, экономичности и экологичности изношенных машин и оборудования новыми приемами их технического обслуживания.....	23
<i>Шум Ал.Ан., Ветошкин А.М., Шум Ан.Ал.</i> Об одном критерии s-симметрии функции трех переменных.....	30
<i>Архаров А.П., Митюшин С.С.</i> Способ установки заготовки на центрах токарного станка.....	36
<i>Слободян С.М., Барчуков Д.А.</i> Особенности применения однослойной углеродной трубки как иглы сканирующего микроскопа.....	40
<i>Попов И.П.</i> Параллельный и последовательный механические резонансы.....	48

ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Михеев И.И., Горячев В.И., Щербакова Д.М.</i> Анализ и обоснование конструкций и работы элементов пускорегулирующей аппаратуры гидропривода ленточного фильтр-пресса.....	56
<i>Яблонев А.Л., Гусева А.М., Щербакова Д.М.</i> Обоснование рациональных конструкций шнековых прессов фрезформовочных машин для добычи кускового торфа.....	63
<i>Фомин К.В., Крылов К.С., Харламов В.Е., Морозихина И.К.</i> Применение методов полунатурного моделирования при преподавании дисциплины «Теория двигателей внутреннего сгорания»	73

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

<i>Бронфельд Г.Б.</i> Метод «надувного шарика» для решения задачи векторной многокритериальной оптимизации с нелинейными целевыми функциями.....	81
<i>Оразгельдыева Д.Б., Ветров А.Н.</i> Алгоритм оценки методов прогнозирования динамики показателей рынка фьючерсов.....	90
<i>Ветров А.Н., Козлова Ю.Г.</i> Структура информационной системы управления оборотным капиталом хозяйствующего субъекта.....	98

CONTENTS

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

<i>Izmailov V.V., Novoselova M.V.</i> On the DMT-model of a discrete adhesive contact.....	5
<i>Barchukov D.A., Tsigvintsev A.V., Afanasieva L.E.</i> Features of formation of structure and properties of high speed steel by pulsed-arc cladding.....	16
<i>Dunaev A.V., Trishckin I.B.</i> Improving resource efficiency and environmental performance of used machinery and equipment with new methods of maintenance.....	23
<i>Shum Al.An., Vetoshkin A.M., Shum An.Al.</i> On one criterion of s-symmetry of a function three variables.....	30
<i>Arkharov A.P., Mityushin S.S.</i> Method of workpiece installation on lathe centers.....	36
<i>Slobodyan S.M., Barchukov D.A.</i> The features of usage of the single-walled carbon tube as a scanning microscope's needle.....	40
<i>Popov I.P.</i> Parallel and serial mechanical resonances.....	48

TRANSPORT, MINING AND CONSTRUCTION MACHINERY

<i>Mikheyev I.I., Goryachev V.I., Scherbakova D.M.</i> Analysis and justification of designs and work of the start-regulation elements of the equipment of the hydraulic actuator of tape filter-press.....	56
<i>Yablonev A.L., Guseva A.M., Scherbakova D.M.</i> Justification of screw press rational structures from milling-forming machines for sod peat extraction.....	63
<i>Fomin K.V., Krylov K.S., Harlamov V.E., Morozikhina I.K.</i> Application of semi-natural modelling methods when teaching the discipline «Theory of internal combustion engines».....	73

INFORMATICS, COMPUTER FACILITIES AND MANAGEMENT

<i>Bronfeld G.B.</i> The method of «inflatable ball» to solve the problem of multi-criteria optimization with nonlinear objective functions.....	81
<i>Orazgeldyeva D.B., Vetrov A.N.</i> Algorithm of estimation and analysis of methods for forecasting the dynamics of indicators of the futures market.....	90
<i>Vetrov A.N., Kozlova Yu.G.</i> Structure of operating capital management information system of economic entity.....	98

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.01

О ДМТ-МОДЕЛИ ДИСКРЕТНОГО АДГЕЗИОННОГО КОНТАКТА

В.В. ИЗМАЙЛОВ, д-р техн. наук, М.В. НОВОСЕЛОВА, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: iz2v@tvcom.ru

© Измайлов В.В., Новоселова М.В., 2019

Получены теоретические зависимости для расчета основных характеристик дискретного контакта технических поверхностей – сближения (деформации контакта) и фактической площади контакта – с учетом адгезионных сил. В основу аналитической модели дискретного адгезионного контакта положена теория адгезионного контакта сфера – плоскость Б.В. Дерягина с соавторами, известная как ДМТ-теория, и теория контакта шероховатых поверхностей Н.Б. Демкина. Описанная в статье модель развивает и уточняет более раннюю модель, построенную на аналогичных предположениях, но не учитывающую силы притяжения неконтактирующих неровностей шероховатой поверхности. Для силы адгезионного взаимодействия используется аналитическая зависимость, вытекающая из потенциала Леннарда-Джонса 3-9. Проанализировано влияние топографических и физико-механических характеристик контактирующих поверхностей на величину деформации и фактической площади контакта. Обсуждается применимость ДМТ-теории адгезионного контакта с помощью безразмерного критерия Д. Тейбора.

Ключевые слова: дискретный контакт, адгезионное взаимодействие, ДМТ-теория, контактная деформация, фактическая площадь контакта.

ВВЕДЕНИЕ

Адгезионное взаимодействие контактирующих поверхностей играет важную роль не только в технике, но и в биологии, медицине и других областях. Особенно это относится к нанотехнологиям, в том числе к так называемым микро- и наноэлектромеханическим системам (МЭМС и НЭМС). Повышению интереса к адгезионному взаимодействию в контактных соединениях различного назначения и конструктивного исполнения способствовало появление технических средств и экспериментальных методик для непосредственного измерения силовых характеристик на микро- и наномасштабных уровнях – атомного и фрикционного силовых микроскопов (AFM, FFM), устройств для измерения поверхностных сил (SFA) и др. Эти экспериментальные установки и методики позволяют не только проверять теоретические модели, но и формировать базы данных, необходимые для применения теоретических методов расчета эксплуатационных характеристик фрикционных и иных контактных узлов.

Одной из первых теоретических моделей адгезионного взаимодействия в контакте поверхностей твердых тел была модель Б.В. Дерягина [1], предложенная в 1934 году и развитая затем в его работах с соавторами [2, 3]. Эта модель известна как модель Дерягина – Муллера – Топорова, или ДМТ-модель (DMT в латинском написании). Она не потеряла своей актуальности до настоящего времени [4–6].

С точки зрения механики контактного взаимодействия, и трибологии в частности, ДМТ-модель адгезионного контакта, как и не менее известная ДКР-модель (JKR) [7], интересна тем, что она описывает адгезионный контакт упругой сферы и плоской поверхности (или двух сфер) и может служить моделью контакта единичной неровности микро- или нанощероховатости. Обобщая эту модель на множественный контакт ансамбля неровностей соответствующего масштаба с учетом статистического распределения параметров этих неровностей (высот и радиусов их вершин), можно получить расчетные зависимости для основных эксплуатационных характеристик дискретного контакта – сближения контактирующих поверхностей (деформации контакта) и фактической площади контакта [8–10]. В указанных работах используется известная модель контакта шероховатых поверхностей Дж. Гринвуда и Дж. Вильямсона [11]. Результаты расчетов в аналитическом виде не выражаются и представлены в виде численных решений.

В работе [12] обобщение модели ДМТ на множественный контакт неровностей шероховатой поверхности выполнено с использованием известной теории контактного взаимодействия Н.Б. Демкина, основанной на использовании так называемой опорной кривой для характеристики микротопографии поверхности. В результате получают наглядные и удобные для анализа аналитические выражения для расчета сближения контактирующих поверхностей и фактической площади контакта.

Однако теоретический анализ, результаты которого представлены в работе [12], выполнен с учетом сил адгезионного взаимодействия только контактирующих выступов. Между тем силы притяжения между неконтактирующими выступами могут внести соответствующий вклад в контактное взаимодействие поверхностей. Поэтому цель данной работы – развитие и уточнение полученных в работе [12] расчетных методик для основных эксплуатационных характеристик дискретного адгезионного контакта на основе ДМТ-модели адгезионного взаимодействия с учетом сил притяжения неконтактирующих выступов.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Сила молекулярного (ван-дер-ваальсова) взаимодействия F сферы с плоской подложкой иллюстрируется рис. 1 и может быть описана зависимостью [9]

$$F = \frac{8}{3} \pi r \gamma \left[\left(\frac{z_0}{y} \right)^2 - \frac{1}{4} \left(\frac{z_0}{y} \right)^8 \right], \quad (1)$$

где r – радиус сферы; γ – поверхностная энергия; z_0 – равновесное расстояние (рис. 1), при котором $F = 0$; y – расстояние между вершиной сферы и плоскостью. При $y < z_0$ между сферой и плоскостью действуют силы отталкивания, при $y > z_0$ – силы притяжения. Уравнение (1) вытекает из потенциала Леннард-Джонса с показателями степени 3 (для сил притяжения) и 9 (для сил отталкивания). Величина равновесного расстояния $z_0 \approx 0,3 \dots 0,5$ нм [9].

Для перехода к множественному контакту шероховатых на микро- или наномасштабном уровне поверхностей рассмотрим рис. 2, на котором изображена схема контакта шероховатой поверхности с гладкой. От нее можно перейти к контакту двух шероховатых поверхностей с помощью понятия эквивалентной шероховатости [13], это обычный прием, часто используемый в механике контактного взаимодействия.

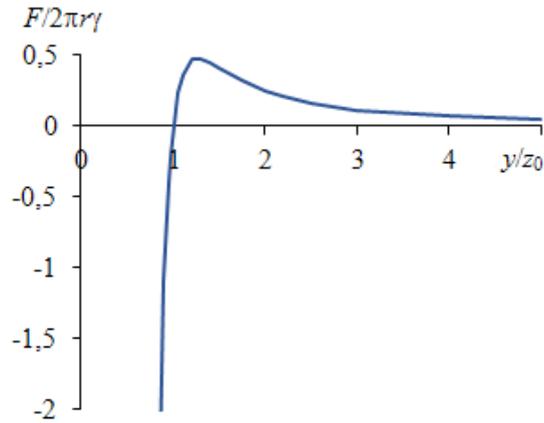


Рис. 1. Зависимость относительной силы притяжения сферы с плоскостью от относительного расстояния

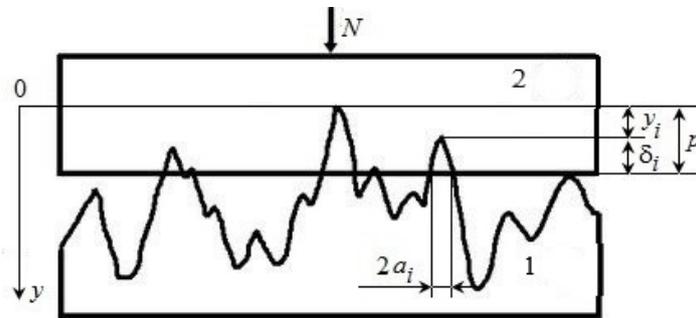


Рис. 2. Схема контакта шероховатой поверхности 1 с гладкой поверхностью 2 (координата y отсчитана от вершины самого высокого выступа):
 y_i – координата вершины i -го выступа; p – сближение поверхностей;
 δ_i – деформация i -го выступа; $2a_i$ – диаметр i -го пятна контакта

Условие равновесия контактирующих тел в проекции на ось y выглядит следующим образом:

$$N + N_D + N'_D = N_H, \quad (2)$$

где N – внешняя сжимающая сила, приложенная к контакту; N_D – суммарная сила адгезионного взаимодействия контактирующих неровностей с плоскостью; N'_D – суммарная сила адгезионного взаимодействия неконтактирующих неровностей; N_H – суммарная сила реакции упруго деформированных неровностей шероховатой поверхности, которая может быть рассчитана на основании известного решения Г. Герца для упругого контакта сферы с плоскостью с обобщением на множественный контакт распределенных по высоте неровностей.

Нагрузки N_{Hi} и N_{Di} , приходящиеся на единственный i -й выступ, определяются выражениями [12]:

$$N_{Hi} = \frac{4}{3} E^* r^{\frac{1}{2}} \delta_i^{\frac{3}{2}}, \quad N_{Di} = 2\pi\gamma r,$$

где E^* – эквивалентный модуль Юнга материалов контактирующих поверхностей; δ_i – деформация i -го выступа (см. рис. 2). Нагрузка N'_{Di} с учетом формулы (1) и рис. 2 определяется выражением

$$N'_{Di} = \frac{8}{3} \pi r \gamma \left[\left(\frac{z_0}{y-p} \right)^2 - \frac{1}{4} \left(\frac{z_0}{y-p} \right)^8 \right],$$

а общая нагрузка N'_D определяется суммированием нагрузок N'_{Di} по всем неконтактирующим выступам:

$$N'_D = \int N'_{Di} dn,$$

где dn – число выступов с высотой в интервале от y до $y + dy$. Подставляя в эту формулу выражение для dn в виде [14]

$$dn = n_m \nu (\nu - 1) \left(\frac{y}{R_p} \right)^{\nu-2} d \left(\frac{y}{R_p} \right),$$

где n_m – число выступов выше уровня средней плоскости шероховатости; R_p – максимальная высота выступов профиля шероховатости; ν – параметр степенной аппроксимации опорной кривой поверхности (кривой Аббота – Файрстоуна) по Н.Б. Демкину, а также пределы интегрирования, получим

$$N'_D = \frac{8}{3} \pi r \gamma n_m \nu (\nu - 1) \int_{p+z_0}^{R_p-z_0} \left[\left(\frac{z_0}{y-p} \right)^2 - \frac{1}{4} \left(\frac{z_0}{y-p} \right)^8 \right] \left(\frac{y}{R_p} \right)^{\nu-1} d \left(\frac{y}{R_p} \right).$$

Выражая величину n_m в виде [14]

$$n_m = \frac{A_n t_m}{2 \pi r R_p},$$

выполняя интегрирование и переходя от нагрузки N'_D к номинальному давлению $q'_{Dn} = \frac{N'_D}{A_n}$, получаем

$$q'_{Dn} = \frac{\gamma}{R_p} t_m \nu (\nu - 1) \left[\frac{4}{3} \left(\frac{z_0}{R_p} \right)^2 \varepsilon^{\nu-3} J_2(\varepsilon) - \frac{1}{3} \left(\frac{z_0}{R_p} \right)^8 \varepsilon^{\nu-9} J_8(\varepsilon) \right], \quad (3)$$

где $\varepsilon = p/R_p$ – относительная деформация контакта; A_n – номинальная (геометрическая) площадь контакта; t_m – относительная опорная длина профиля на уровне средней линии; $J_n(\varepsilon)$ – интеграл вида

$$J_n(\varepsilon) = \int_{1+\frac{z_0}{\varepsilon R_p}}^{\frac{1}{\varepsilon}(1-\frac{z_0}{R_p})} x^{\nu-2} (x-1)^{-n} dx.$$

Для контактирующих выступов аналогичные расчеты были выполнены нами в работе [12], в результате чего получены уравнения, аналогичные (3) для составляющих номинального контактного давления:

давление, обусловленное реакцией упруго деформированных неровностей шероховатой поверхности (герцевская составляющая):

$$q_{Hn} = \frac{2K_1 t_m}{3\pi} E^* \sqrt{\frac{R_p}{r}} \varepsilon^{v+\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

где $K_1 = v(v-1)B\left(\frac{5}{2}; v-1\right)$; $B(a,b)$ – бета функция;

давление, обусловленное адгезионным взаимодействием контактирующих выступов:

$$q_{Dn} = \frac{t_m v \gamma}{R_p} \varepsilon^{v-1}. \quad (5)$$

Тогда выражение (2) можно переписать для номинального контактного давления $q_n = N/A_n$, приложенного к контактному соединению

$$q_n(\varepsilon) = q_{Hn} - q_{Dn} - q'_{Dn}. \quad (6)$$

Для расчета фактической площади контакта можно воспользоваться известной степенной аппроксимацией начального участка опорной кривой, предложенной Н.Б. Демкиным:

$$\eta_r = \alpha t_m \varepsilon^v, \quad (7)$$

где $\eta_r = A_r/A_n$ – относительная фактическая площадь контакта; $A_r = \sum \pi a_i^2$ – абсолютная фактическая площадь контакта; α – коэффициент, учитывающий отличие площади контакта от площади геометрического сечения выступа. Для упругого контакта $\alpha = 0,5$. Уравнения (6) и (7) выражают параметрическую зависимость фактической площади контакта от номинального контактного давления.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты проиллюстрируем на примере контакта двух модельных поверхностей, параметры которых приведены в таблице. Они совпадают с параметрами, использованными в работе [12], и соответствуют реальным параметрам рабочей поверхности концевой меры длины (т.н. плитка Иогансона).

Параметры контактирующих поверхностей

Топографические				Физико-механические		
R_p , нм	r , нм	t_m	v	E^* , ГПа	z_0 , нм	γ , Дж/м ²
10	200	0,5	3	100	0,5	0,1; 0,25

На рис. 3 и 4 представлены зависимости основных характеристик дискретного контакта – относительной деформации контакта (относительного сближения контактирующих поверхностей) и относительной площади фактического контакта – от приложенного к контакту внешнего сжимающего давления, рассчитанные по уравнениям (6) и (7) для контакта поверхностей с характеристиками, представленными в таблице. Расчеты выполнены как с учетом сил притяжения неконтактирующих выступов (суммируются все три слагаемых в уравнении (6)), так и без учета этих сил (суммируются первое и второе слагаемые в уравнении (6)). Для сравнения на рис. 3 и 4 показаны зависимости относительной деформации контакта и относительной

фактической площади контакта от номинального давления в отсутствие адгезионного взаимодействия поверхностей ($\gamma = 0$).

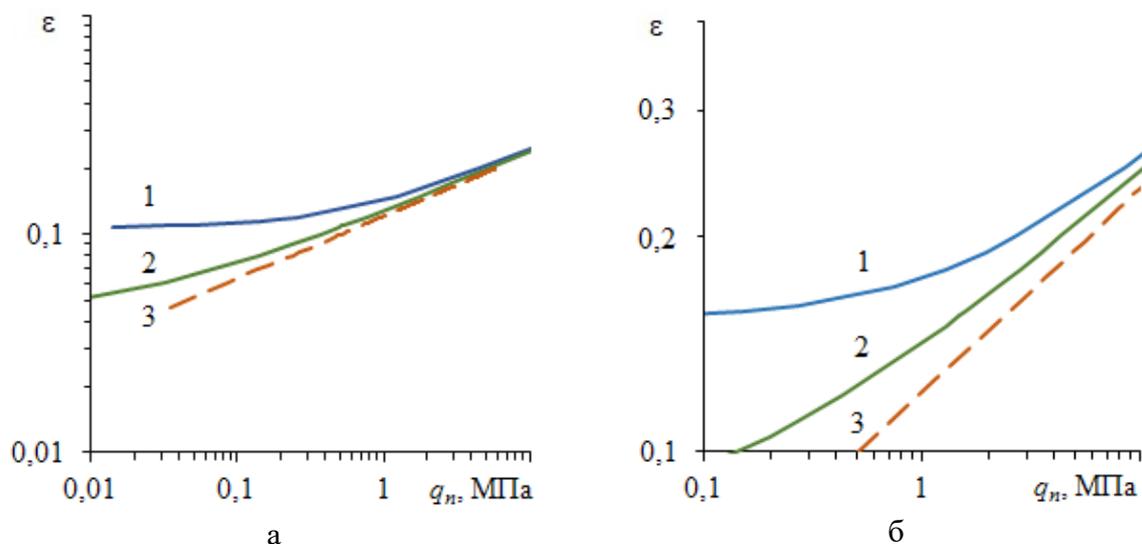


Рис. 3. Зависимость относительной деформации контакта от номинального контактного давления: а – $\gamma = 0,1$ Дж/м²; б – $\gamma = 0,25$ Дж/м²; 1 – с учетом взаимодействия неконтактирующих выступов; 2 – без учета взаимодействия неконтактирующих выступов; 3 – без учета адгезии (герцевский контакт)

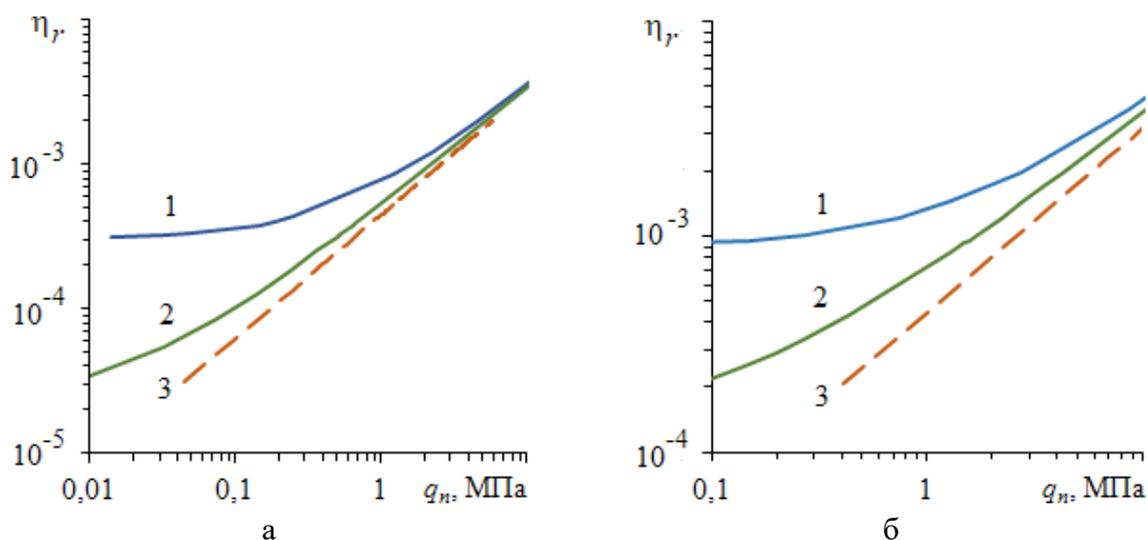


Рис. 4. Зависимость относительной фактической площади контакта от номинального контактного давления: а – $\gamma = 0,1$ Дж/м²; б – $\gamma = 0,25$ Дж/м²; 1 – с учетом взаимодействия неконтактирующих выступов; 2 – без учета взаимодействия неконтактирующих выступов; 3 – без учета адгезии (герцевский контакт)

Как и следовало ожидать, чем больше величина поверхностной энергии, тем больше относительная деформация и относительная фактическая площадь контакта при равных значениях приложенного номинального контактного давления.

Из рис. 3 и 4 видно, что силы притяжения неконтактирующих выступов вносят существенный вклад в общую величину контактного давления. На основании уравнения (6) можно оценить вклад каждого слагаемого в правой части уравнения (6) в общую величину контактного давления. Результаты такой оценки представлены на рис. 5. Видно, что при малых деформациях контакта и, соответственно, при малом числе контактирующих выступов основной вклад в адгезионное взаимодействие вносит притяжение неконтактирующих выступов (q'_{Dn} , линия 4). С ростом деформации контакта (и числа контактирующих выступов) неконтактирующие и контактирующие выступы меняются ролями в формировании общей силы адгезионного взаимодействия.

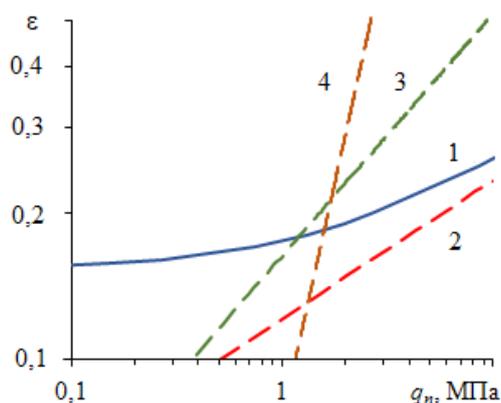


Рис. 5. Вклад отдельных составляющих в общую величину номинального контактного давления согласно уравнению (6):

- 1 – общая величина q_n ; 2 – герцевское давление q_{Hn} ;
- 3 – взаимодействие контактирующих выступов q_{Dn} ;
- 4 – взаимодействие неконтактирующих выступов q'_{Dn}

Анализ полученных результатов по оценке адгезионного взаимодействия в контакте технических поверхностей будет неполным без обсуждения влияния топографических параметров контактирующих поверхностей на характеристики дискретного адгезионного контакта.

Обратим внимание на то, что в таблице приведены параметры так называемой субшероховатости (наношероховатости) контактирующих поверхностей. Это объясняется тем, что адгезионное взаимодействие заметно проявляется только на наномасштабном уровне, т.е. именно на уровне наношероховатости. На микромасштабном уровне (обычная шероховатость с неровностями высотой порядка десятых долей и единиц микрометров) адгезионным взаимодействием в большинстве случаев можно пренебречь.

Нанотопография контактирующих поверхностей в рассматриваемой модели характеризуется максимальной высотой выступов профиля наношероховатости R_p , безразмерным соотношением R_p/r и параметрами степенной аппроксимации опорной кривой v и t_m . Соотношение R_p/r характеризует форму неровностей наношероховатости. Влияние параметров R_p и R_p/r легко оценить по уравнениям (3)–(5). Менее наглядно влияние параметров аппроксимации опорной кривой профиля v и t_m , которые фактически характеризуют распределение выступов шероховатости по высоте. При этом параметр t_m для большинства поверхностей меняется в довольно узких пределах $t_m = 0,4 \dots 0,6$, поэтому подробнее остановимся на влиянии параметра v на характеристики адгезионного дискретного контакта. Это влияние иллюстрируется на рис. 6. При $v = 2$ выступы шероховатости более равномерно распределены по высоте (функция плотности

вероятности близка к равномерному распределению), при $\nu = 3$ распределение выступов шероховатости по высоте ближе к нормальному. Чем более равномерно распределены выступы шероховатости по высоте, тем меньше деформация контакта при одинаковых значениях контактного давления (больше жесткость контакта) и тем больше площадь фактического контакта, что следует из формы опорной кривой.

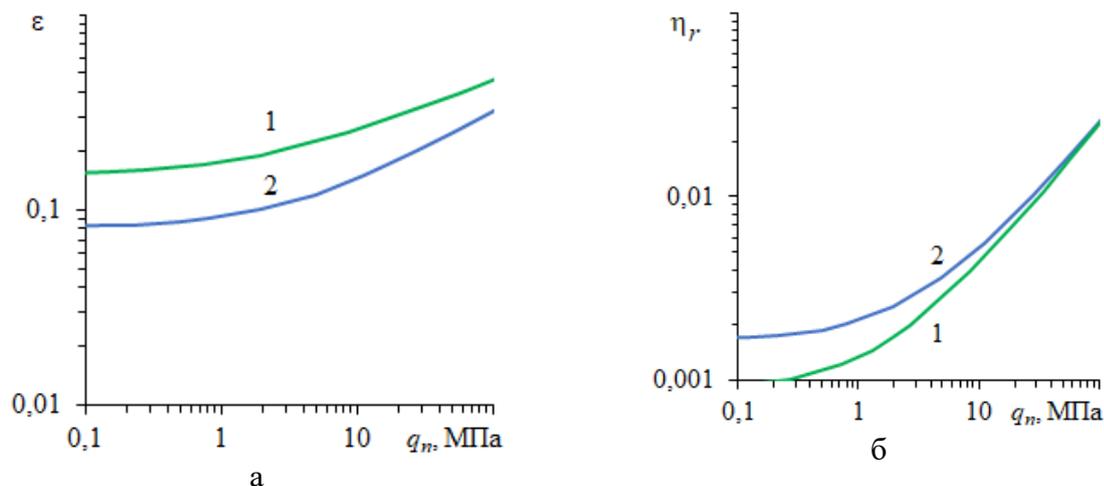


Рис. 6. Влияние параметра аппроксимации опорной кривой ν на относительную: а – деформацию контакта; б – площадь фактического контакта; 1 – $\nu = 3$; 2 – $\nu = 2$

КРИТЕРИЙ ПРИМЕНИМОСТИ МОДЕЛИ ДМТ

Д. Тейбором [15] предложен безразмерный критерий, ограничивающий области применимости двух известных теорий адгезионного взаимодействия – ДМТ и ДКР. Этот критерий имеет вид

$$\mu = \left(\frac{r\gamma^2}{E^{*2}z_0^3} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (8)$$

При малых значениях μ справедлива ДМТ-теория, при больших – ДКР-теория. Верхний предел величины μ , при котором применима ДМТ-теория, в соответствии с работами [4, 16] примем равным 0,24. Тогда на основании уравнения (8) можно построить своеобразную карту применимости ДМТ-теории, представленную на рис. 7.

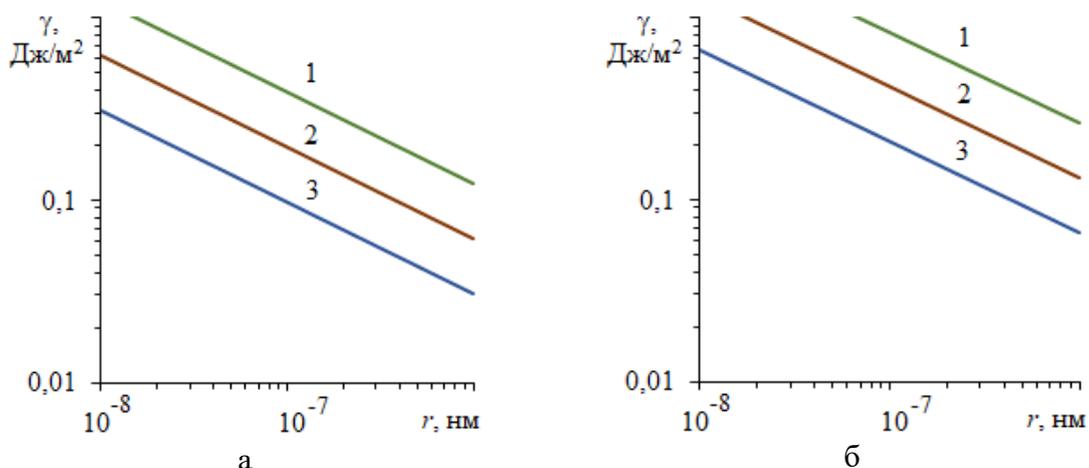


Рис. 7. Области применимости ДМТ-теории: а – $z_0 = 0,3$ нм; б – $z_0 = 0,5$ нм; 1 – $E^* = 50$ ГПа; 2 – $E^* = 100$ ГПа; 3 – $E^* = 200$ ГПа

Области, лежащие ниже прямых, соответствующих указанным значениям эквивалентного модуля Юнга, являются областями применимости ДМТ-модели адгезионного контакта. Как нетрудно убедиться, приведенные в таблице параметры контактирующих поверхностей соответствуют критерию Д. Тейбора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Неослабевающее и даже усиливающееся внимание специалистов в области физики и механики поверхности и контактного взаимодействия к адгезионным явлениям в контакте объясняется универсальностью явления адгезии, которая проявляется не только в технических, но и в биологических и в медицинских системах. На микро- и наномасштабных уровнях адгезионное взаимодействие может оказывать заметное влияние на процессы контактного взаимодействия и, следовательно, на основные характеристики этих систем, в том числе на надежность современных технических устройств. Для теоретического описания процессов в дискретных адгезионных контактах используются как аналитические, так и численные модели. Применение их позволяет проанализировать факторы, влияющие на эти процессы, оценить степень этого влияния и наметить пути управления ключевыми факторами с целью повышения надежности технических устройств.

Для успешного применения расчетных моделей необходимо формирование баз данных по различным характеристикам технических (и не только) поверхностей: топографических, механических, физических.

Большое значение имеют прямые методы экспериментального определения адгезионных сил в контакте различных реальных поверхностей в различных условиях. Такие исследования ведутся [17–19], однако полученных результатов явно недостаточно для формирования сколько-нибудь систематической справочно-информационной базы данных по характеристикам адгезионного дискретного контакта реальных технических поверхностей. Работы в этом направлении должны и несомненно будут продолжаться.

ЛИТЕРАТУРА

1. Derjaguin B.V. Untersuchungen über die Reibung und Adhäsion, IV. Theorie des Anhaftens kleiner Teilchen // *Kolloid Zeitschrift*. 1934. V. 69. № 2. S. 155–164.
2. Derjaguin B.V., Muller V.M., Toporov Yu.P. Effect of contact deformations on the adhesion of particles // *J. Colloid. Interface Sci.* 1975. V. 53. № 2. P. 314–326.
3. Muller V.M., Derjaguin B.V., Toporov Yu.P. On two methods of calculation of the force of sticking of an elastic sphere to a rigid plane // *Colloids and Surfaces*. 1983. V. 7. № 3. P. 251–259.
4. Violano G., Demelio G.P., Afferante L. On the DMT adhesion theory: from the first studies to the modern applications in rough contacts // *Procedia Structural Integrity*. 2018. V. 12. P. 58–70.
5. Prokopovich P., Perni S. Comparison of JKR- and DMT-based multi-asperity adhesion model: Theory and experiment // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2011. V. 383. № 1–3. P. 95–101.
6. Prokopovich P., Starov V. Adhesion models: From single to multiple asperity contacts // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2011. V. 168. № 1–2. P. 210–222.
7. Johnson K.L., Kendall K., Roberts A.D. Surface Energy and the Contact of Elastic Solids // *Proc. Roy. Soc. Ser. A*. 1971. V. A324. № 1558. P. 301–313.
8. Fuller K.N.G., Tabor D. The Effect of Surface Roughness on the Adhesion of Elastic Solids // *Proc. Roy. Soc. Ser. A*. 1975. V. 345. № 1642. P. 327–342.

9. Свириденко А.И., Чижик С.А., Петроковец М.И. Механика дискретного фрикционного контакта. Минск: Навука і тэхніка. 1990. 272 с.
10. Maugis D. On the contact and adhesion of rough surfaces // *Journal of Adhesion Science and Technology*. 1996. V. 10. № 2. P. 161–175.
11. Greenwood J.A., Williamson J.B.P. Contact of nominally flat surfaces // *Proc. Roy. Soc.* 1966. V. A 295. № 1442. P. 300–319.
12. Измайлов В.В. Дискретный контакт с адгезией // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2014. Вып. 1 (25). С. 51–57.
13. Демкин Н.Б. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей. М.: Наука, 1970. 227 с.
14. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Контакт твердых тел и его проводимость: монография. Тверь: ТГТУ, 2010. 112 с.
15. Tabor D. Surface forces and surface interactions // *J. Colloid. Interface Sci.* 1977. V. 58. № 1. P. 2–13.
16. Greenwood J.A. On the DMT theory // *Tribology Letters*. 2007. V. 26. № 3. P. 203–211.
17. Yijie Jiang, Turner K.T. Measurement of the strength and range of adhesion using atomic force microscopy // *Extreme Mechanics Letters*. 2016. V. 9. № 1. P. 119–126.
18. Григорьев А.Я., Дубравин А.М., Ковалев А.В. [и др.]. Измерение контактной адгезии и аттракционного взаимодействия технических поверхностей // *Трение и износ*. 2003. Т. 24. № 4. С. 405–412.
19. Кузнецова Т.А., Чижик Н.В., Ширяева Т.И. Микрозонды для определения силы адгезии и удельной поверхностной энергии методом атомно-силовой микроскопии // *Приборы и методы измерений*. 2013. № 1 (6). С. 41–45.

ON THE DMT-MODEL OF A DISCRETE ADHESIVE CONTACT

V.V. IZMAILOV, Dr. Sci., M.V. NOVOSELOVA, Cand. Sci.

Tver State Technical University, 22 Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: iz2v@tvcom.ru

Theoretical dependences are obtained for the calculation of the main characteristics of the discrete contact of engineering surfaces – approach of surfaces (contact deformation) and the real contact area – taking into account the adhesive forces. The analytical model of the discrete adhesive contact is based on the B.V. Derjaguin’s with co-authors theory of adhesive sphere-plane contact, known as the DMT theory, and on the N.B. Demkin’s theory of a contact of rough surfaces. The model described in the article develops and refines the earlier model, built on similar assumptions, but not taking into account the attractive forces of noncontacting asperities of a rough surface. The analytical dependence, which follows from the Lennard-Jones potential 3-9, is used for the adhesive strength. The influence of the topographic and physical-mechanical properties of the contacting surfaces on the values of the contact deformation and the real contact area is analyzed. The applicability of the DMT theory of adhesive contact is discussed using the dimensionless D. Tabor criterion.

Keywords: discrete contact, adhesive interaction, DMT-theory, contact deformation, real contact area.

REFERENCES

1. Derjaguin B.V. Untersuchungen über die Reibung und Adhäsion, IV. Theorie des Anhaftens kleiner Teilchen. *Kolloid Zeitschrift*. 1934. V. 69. No. 2, pp. 155–164.
2. Derjaguin B.V., Muller V.M., Toporov Yu.P. Effect of contact deformations on the adhesion of particles. *J. Colloid. Interface Sci.* 1975. V. 53. No. 2, pp. 314–326.
3. Muller V.M., Derjaguin B.V., Toporov Yu.P. On two methods of calculation of the force of sticking of an elastic sphere to a rigid plane. *Colloids and Surfaces*. 1983. V. 7. No. 3, pp. 251–259.
4. Violano G., Demelio G.P., Afferante L. On the DMT adhesion theory: from the first studies to the modern applications in rough contacts. *Procedia Structural Integrity*. 2018. V. 12, pp. 58–70.
5. Prokopovich P., Perni S. Comparison of JKR- and DMT-based multi-asperity adhesion model: Theory and experiment. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2011. V. 383. No. 1–3, pp. 95–101.
6. Prokopovich P., Starov V. Adhesion models: From single to multiple asperity contacts. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2011. V. 168. No. 1–2, pp. 210–222.
7. Johnson K.L., Kendall K., Roberts A.D. Surface Energy and the Contact of Elastic Solids. *Proc. Roy. Soc. Ser. A*. 1971. V. A324. No. 1558, pp. 301–313.
8. Fuller K.N.G., Tabor D. The Effect of Surface Roughness on the Adhesion of Elastic Solids. *Proc. Roy. Soc. Ser. A*. 1975. V. 345. No. 1642, pp. 327–342.
9. Sviridenok A.I., Chizhik S.A., Petrokovec M.I. *Mekhanika diskretnogo frikcionnogo kontakta [Mechanics of a discrete frictional contact]*. Minsk: Navuka i tekhnika. 1990. 272 p.
10. Maugis D. On the contact and adhesion of rough surfaces. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 1996. V. 10. No. 2, pp. 161–175.
11. Greenwood J.A., Williamson J.B.P. Contact of nominally flat surfaces. *Proc. Roy. Soc.* 1966. V. A 295. No. 1442, pp. 300–319.
12. Izmailov V.V. Discrete contact with adhesion. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2014. No. 1 (25), pp. 51–57. (In Russian).
13. Demkin N.B. *Kontaktirovanie sherohovatykh poverhnostej [Contact of rough surfaces]*. M.: Nauka, 1970. 227 p.
14. Izmajlov V.V., Novoselova M.V. *Kontakt tverdykh tel i ego provodimost': monografiya [Contact of solids and its conductivity: monography]*. Tver: TGTU, 2010. 112 p.
15. Tabor D. Surface forces and surface interactions. *J. Colloid. Interface Sci.* 1977. V. 58. No. 1, pp. 2–13.
16. Greenwood J.A. On the DMT theory. *Tribology Letters*. 2007. V. 26. No. 3, pp. 203–211.
17. Yijie Jiang, Turner K.T. Measurement of the strength and range of adhesion using atomic force microscopy. *Extreme Mechanics Letters*. 2016. V. 9. No. 1, pp. 119–126.
18. Grigor'ev A.Ya., Dubravin A.M., Kovalev A.V. [et al.]. Measuring of a contact adhesion and attraction of engineering surfaces. *Trenie i iznos*. 2003. V. 24. No. 4, pp. 405–412. (In Russian).
19. Kuznecova T.A., Chizhik N.V., Shiryayeva T.I. Microprobes for the evaluation of a adhesive force and specific surface energy by atomic force microscopy. *Pribory i metody izmerenij*. 2013. № 1 (6), pp. 41–45. (In Russian).

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ ПРИ ИМПУЛЬСНО-ДУГОВОЙ НАПЛАВКЕ

Д.А. БАРЧУКОВ¹, канд. техн. наук, А.В. ЦЫГВИНЦЕВ²,
Л.Е. АФАНАСЬЕВА¹, канд. физ.-мат. наук

¹Тверской государственной технической университет, 170026, Тверь,
наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: bda@mail.ru

²ОАО Тверской вагоностроительный завод, 170003, Тверь,
Петербургское шоссе, 456, e-mail: avc76@yandex.ru

© Барчуков Д.А., Цыгвинцев А.В., Афанасьева Л.Е., 2019

Представлены результаты экспериментальных исследований структуры и свойств быстрорежущей стали марки P2M8, наплавленной порошковой проволокой с помощью импульсно-дуговой наплавки на конструкционную сталь. Установлено, что наплавленный металл имеет мелкозернистую структуру со средним диаметром зерна 10...11 мкм. Фазовый состав наплавленной быстрорежущей стали – мартенсит, остаточный аустенит, дисперсные эвтектические и специальные карбиды. Средний уровень микротвердости около 7000 МПа. Металлографические исследования биметаллических образцов не выявили пор, трещин и других дефектов. Подтверждена целесообразность применения импульсно-дуговой наплавки с мелкокапельным переносом электродного материала для изготовления биметаллического режущего инструмента с наплавленной быстрорежущей сталью рабочей частью.

Ключевые слова: импульсно-дуговая наплавка, быстрорежущая сталь, порошковая проволока, микроструктура, микротвердость.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение эффективности машиностроительного производства возможно за счет внедрения современных технологий в процессы изготовления деталей и инструментов. Важная роль в реализации этого вопроса принадлежит изготовительной и восстановительной наплавке [1–7]. Применение технологии наплавки позволяет снизить себестоимость, повысить технологичность изготовления и дает возможность многократного восстановления изделий. В настоящее время в промышленности широко используются электродуговая, лазерная, плазменная, газовая и другие технологии наплавки. Дальнейшее развитие наплавки происходит по пути совершенствования технологии и применения материалов с улучшенными сварочно-технологическими и служебными характеристиками.

Применение наплавки быстрорежущих сталей и совершенствование технологии изготовления биметаллических инструментов является важным и актуальным, т.к. стоимость основных легирующих компонентов в этих сталях, прежде всего вольфрама и кобальта, высокая [7–16]. Выбор способа и определение параметров режима наплавки необходимо осуществлять таким образом, чтобы обеспечить требуемый комплекс эксплуатационных и механических свойств быстрорежущих сталей. Энергоэффективной и ресурсосберегающей технологией изготовления наплавленного биметаллического инструмента является импульсно-дуговая наплавка, имеющая ряд преимуществ. При этом процессе на основной сварочный ток непрерывно горящей дуги налагают кратковременные импульсы тока, которые ускоряют перенос капель металла и позволяют контролировать размер переносимых капель. При наложении на

дугу импульсов определенной энергии и частоты достигается управляемый перенос электродного металла с минимальным разбрызгиванием [7]. Импульсно-дуговая наплавка плавящимся электродом расширяет технологические возможности наплавки в защитных газах. Цель настоящей работы – исследование структуры и свойств быстрорежущей стали P2M8, наплавленной порошковой проволокой с помощью импульсно-дуговой наплавки.

МЕТОДЫ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для наплавки быстрорежущей стали использовали порошковую проволоку ROBODUR K AR диаметром 1,2 мм (производства группы компаний Welding Alloys Ltd (Великобритания)), которая по химическому составу близка к марке стали P2M8. Данная проволока используется в производстве и для ремонта изделий машиностроения, подверженных износу, таких как режущий инструмент, лезвия гильотин, фрез, ножей, направляющих проволоки и многих других [7].

Наплавку выполняли с помощью сварочного полуавтомата нового поколения ALPHA Q 351, разработанного на основе инверторной технологии немецкой компанией EWM. Учитывая необходимость получения наплавленной быстрорежущей стали в закаленном состоянии, экспериментально определили оптимальные параметры режима наплавки (указаны в табл. 1), обеспечивающие минимальное проплавление материала основы и создающие металлургическое сплавление наплавленного металла и подложки.

Таблица 1

Параметры режима импульсно-дуговой наплавки

Параметры режима наплавки	Значение
Сила тока $I_{св}$, А	70...80
Напряжение U_d , В	11...15
Скорость наплавки V_n , м/ч	3,6...4,5
Расход защитного газа Q , л/мин	18...20

В качестве материала подложки для наплавки использовали заготовки из среднеуглеродистой легированной стали 30ХГСА (ГОСТ 103-76) размером $8 \times 16 \times 100$ мм. Главным критерием выбора материала корпуса инструмента являются его механические свойства. Сталь марки 30ХГСА после закалки от температуры 880°C с охлаждением в масле и низкотемпературного отпуска при температуре 200°C обладает повышенной прочностью ($\sigma_b = 1700$ МПа) в сочетании с достаточной вязкостью и пластичностью [7]. Выполняли одноваликовую наплавку быстрорежущей стали дугой прямого действия обратной полярности в защитной среде аргона.

Для измерения микротвердости образцов использовали прибор ПМТ-3. Исследование микроструктуры выполняли методами растровой электронной микроскопии (РЭМ) с помощью микроскопа JEOL JSM-6610LV (Япония). Для изучения распределения легирующих компонентов в плоскости шлифов использовали энергодисперсионный спектрометр Oxford INCA Energy 350.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Работоспособность инструмента из быстрорежущей стали определяется ее свойствами, важнейшими из которых являются твердость, прочность, износостойкость и теплостойкость [8]. Для получения наплавленной быстрорежущей стали с высокими

эксплуатационными характеристиками необходимо формирование наплавленного металла с мелким зерном, однородным распределением высокодисперсных эвтектических и специальных карбидов в структуре стали [13–16].

Макрошлиф наплавленного биметаллического образца представлен на рис. 1. Прямоугольниками обозначены области исследования химического состава с помощью рентгеноспектрального микроанализа. Распределение массового содержания химических компонентов по спектрам дано в табл. 2: 1 – в металле подложки; 2, 3 и 4 – в наплавленном металле. Анализ полученных результатов показал высокую химическую однородность наплавленной быстрорежущей стали по высоте валика. Благодаря незначительному проплавлению основы, импульсно-дуговая наплавка позволяет получить наплавленную быстрорежущую сталь требуемого химического состава.



Рис. 1. Макрошлиф наплавленного биметаллического образца. Прямоугольниками выделены области выполнения рентгеноспектрального микроанализа

Таблица 2
Распределение массового содержания химических компонентов
в основном и наплавленном металле, %

Номер участка	Легирующий компонент							
	Si	V	Cr	Mn	Nb	Mo	W	Fe и примеси
1	1,09	–	1,04	0,89	–	–	–	ост.
2	0,47	0,95	4,16	0,79	2,43	6,52	2,32	ост.
3	0,50	0,88	4,12	0,63	2,78	6,46	2,13	ост.
4	0,53	0,98	4,37	0,65	2,65	6,43	2,17	ост.

Известно, что наплавленные быстрорежущие стали склонны к образованию трещин [8]. Для предотвращения образования трещин в практике дуговой наплавки обычно используют предварительный и сопутствующий подогрев заготовок до температуры 500...600 °С и последующее их замедленное охлаждение в печи. Также наплавленный металл подвергается отжигу, механической обработке изделия и повторной закалке и многократному отпуску [7]. Такой технологический процесс требует дополнительных операций при производстве изделий, очень трудоемок и неэффективен.

Импульсно-дуговая наплавка плавящимся электродом расширяет технологические возможности изготовления биметаллических инструментов.

Уменьшение глубины расплавления основного металла кроме постоянства химического состава наплавленной быстрорежущей стали обеспечивает возможность значительного уменьшения внутренних напряжений, деформации и предотвращения образования трещин. Металлографические исследования полученных биметаллических образцов не выявили пор, трещин и других дефектов. Выбранные режимы наплавки обеспечили формирование в наплавленном металле структуры закалки со средним уровнем микротвердости $HV = 7000$ МПа (рис. 2).

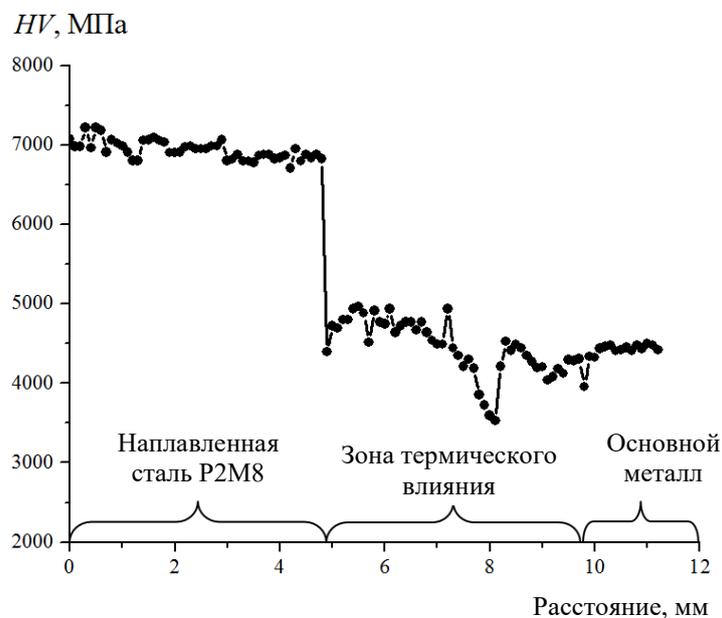


Рис. 2. Распределение микротвердости в наплавленном биметаллическом образце

Микроструктура быстрорежущей стали после наплавки (рис. 3) представляет собой игольчатый мартенсит, остаточный аустенит и карбиды.

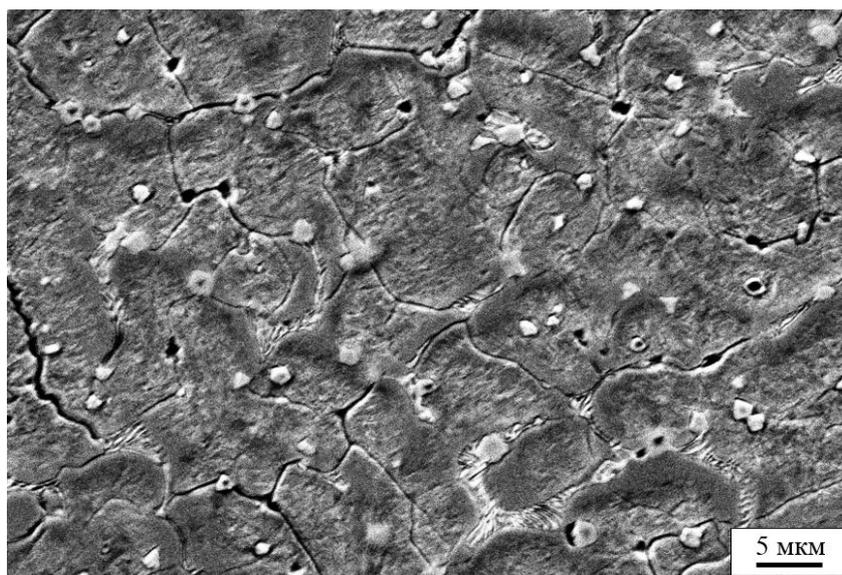


Рис. 3. РЭМ-изображение микроструктуры наплавленной быстрорежущей стали P2M8

При кристаллизации наплавленного металла сформировалась мелкозернистая структура со средним диаметром зерна 10...11 мкм и равномерным распределением эвтектических и специальных дисперсных карбидов. Эвтектика на основе карбидов M_2C вытянутой стержнеобразной формы [7]. Обогащенные ниобием одиночные первичные карбиды MC располагаются как по телу зерна, так и по границам зерен (см. рис. 3). Использование Nb как сильного карбидообразующего элемента позволяет улучшать структуру быстрорежущей стали на стадии первичной кристаллизации.

При наплавке быстрорежущей стали на конструкционную в последней сформировалась зона термического влияния протяженностью около 4 мм со слоистым строением. Она состоит из зоны повторной закалки (полной и неполной) и зоны отпуска. Как показали измерения микротвердости (рис. 2), наибольшее разупрочнение стали 30ХГСА происходит в области высокотемпературного отпуска, где распад мартенсита с образованием структур троостита или сорбита приводит к снижению HV от 4700 до 3500 МПа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Импульсно-дуговая наплавка с мелкокапельным переносом электродного материала позволяет получать биметаллические соединения с минимальным проплавлением основы, при этом наплавленный металл имеет требуемый химический состав. Металлографические исследования полученных биметаллических образцов не выявили пор, трещин и других дефектов. Проведенные исследования подтвердили эффективность использования технологии импульсно-дуговой наплавки быстрорежущей стали на конструкционную.

БЛАГОДАРНОСТИ

Металлографические исследования выполнены с использованием оборудования регионального центра коллективного пользования на базе Тверского государственного университета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фомичев Е.О., Мартышин Г.В. Обоснование технологии ремонта моноколес методом аргонодуговой сварки и наплавки // *Сварочное производство*. 2014. № 4. С. 29–34.
2. Бойко И.А., Гринь А.Г. Влияние состояния поверхности порошковой проволоки на стабильность дугового процесса // *Сварочное производство*. 2014. № 7. С. 8–13.
3. Титаренко В.И., Голякевич А.А., Орлов Л.Н., Мосьпан В.В., Бабенко М.А., Телюк Д.В., Тарасенко В.В. Восстановительная наплавка валков прокатных станов порошковой проволокой // *Сварочное производство*. 2013. № 7. С. 29–32.
4. Фролов В.А., Крюков М.А., Рябенко Б.В., Курдюков А.В. Особенности наплавки на рабочие поверхности лопатки турбин // *Сварочное производство*. 2014. № 2. С. 19–24.
5. Hashimoto M., Tanaka T., Inoue T., Yamashita M., Kurahashi R., Terakado R. Development of cold rolling mill rolls of high speed steel type by using continuous pouring process for cladding // *ISIJ international*. 2002. V. 42. № 9. P. 982–989.
6. Niu H.J., Chang I.T.H. Microstructural evolution during laser cladding of M2 high-speed steel // *Metallurgical and materials transactions A*. 2000. V. 31. № 10. P. 2615–2625.
7. Барчуков Д.А. Повышение работоспособности быстрорежущих сталей за счет совершенствования их структурного состояния: дисс. ... канд. техн. наук: 05.16.01 / Юго-Западный государственный университет. Тверь. 2013. 154 с.

8. Геллер А.Ю. Инструментальные стали. М.: Металлургия, 1983. 527 с.
9. Иванов И.Н., Кузнецова Г.П. Особенности инструмента, оснащенного элементами из быстрорежущих сталей // *Сварочное производство*. 2014. № 2. С. 43–45.
10. Мозговой И.Г., Шнейдер Е.А. Влияние термического цикла изготовления биметаллического режущего инструмента на структуру и механические характеристики зоны сплавления // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2011. № 4. С. 46–49.
11. Афанасьева Л.Е., Барабонова И.А., Барчуков Д.А. Упрочняющие технологии и покрытия в машиностроении: учебное пособие. Тверь: Тверской государственный технический университет, 2017. 116 с.
12. Барчуков Д.А. Технологическая прочность как критерий работоспособности биметаллических соединений, получаемых наплавкой быстрорежущих сталей на конструкционные стали // *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования*. 2015. № 8. С. 93–98.
13. Чаус А.С., Латышев И.В. Влияние ванадия, титана и ниобия на формирование структуры литой вольфрамомолибденовой быстрорежущей стали // *Физика металлов и металловедение*. 1999. № 5. С. 50–57.
14. Юлмаз А. Микроструктурный анализ новой литой быстрорежущей стали, легированной ниобием // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2012. № 7. С. 28–32.
15. Кремнев Л.С. Теория легирования и создание на ее основе теплостойких инструментальных сталей и сплавов оптимального состава // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2008. № 11. С. 18–28.
16. Кремнев Л.С., Онегина А.К., Виноградова Л.А. Особенности превращений, структуры и свойств молибденовых быстрорежущих сталей // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2009. № 12. С. 13–19.

FEATURES OF FORMATION OF STRUCTURE AND PROPERTIES OF HIGH SPEED STEEL BY PULSED-ARC CLADDING

D.A. BARCHUKOV¹, Cand Sci, A.V. TSIGVINTSEV², L.E. AFANASIEVA¹, Cand Sci

¹Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: bda@mail.ru

²OJSC Tver Carriage Works, 45-b, Petersburg highway, 170003, Tver,
Russian Federation, e-mail: avc76@yandex.ru

The results of experimental studies of the structure and properties of R2M8 high-speed steel, deposited with flux-cored wire using pulsed arc cladding on structural steel are presented. It is established that the deposited metal has a fine-grained structure with an average grain diameter of 10...11 μm . The phase composition of the deposited high-speed steel – martensite, residual austenite, dispersed eutectic and special carbides. The average level of microhardness is about 7000 MPa. Metallographic studies of bimetallic samples did not reveal pores, cracks and other defects. The expediency of the use of pulse arc cladding with small-drop transfer of electrode material for the manufacture of bimetallic cutting tools with a weld part with high-speed steel welded has been confirmed.

Keywords: pulse arc cladding, high speed steel, flux cored wire, microstructure, microhardness.

ACKNOWLEDGMENTS

These studies were performed using the equipment of the Regional Center of Tver State University.

REFERENCES

1. Fomichev E.O., Martyshin G.V. Justification of the technology of repair of mono-wheels by the method of argon-arc welding and surfacing *Svarochnoye proizvodstvo*. 2014. No 4. pp. 29–34. (In Russian).
2. Boyko I.A., Grin A.G. The influence of the state of the cored wire surface on the stability of the arc process. *Svarochnoye proizvodstvo*. 2014. No 7, pp. 8–13. (In Russian).
3. Titarenko V.I., Golyakevich A.A., Orlov L.N., Mosypan V.V., Babenko M.A., Telyuk D.V., Tarasenko V.V. Restoration surfacing of the rolls of rolling mills with powder wire. *Svarochnoye proizvodstvo*. 2013. No 7, pp. 29–32. (In Russian).
4. Frolov V.A., Kryukov M.A., Ryabenko B.V., Kurdyukov A.V. Features of surfacing on the working surfaces of turbine blades. *Svarochnoye proizvodstvo*. 2014. No 2, pp. 19–24. (In Russian).
5. Hashimoto M., Tanaka T., Inoue T., Yamashita M., Kurahashi R., Terakado R. Development of cold rolling mill rolls of high speed steel type by using continuous pouring process for cladding. *ISIJ international*. 2002. V. 42. No 9, pp. 982–989.
6. Niu H.J., Chang I.T. H. Microstructural evolution during laser cladding of M2 high-speed steel. *Metallurgical and materials transactions A*. 2000. V. 31. No 10, pp. 2615–2625.
7. Barchukov D.A. Improving the efficiency of high-speed steels by improving their structural state. Cand. Diss. (Engineering). Tver. 2013. 154 p.
8. Geller A.Yu. Instrumentalnye stali. [Tool steel]. M.: Metallurgy. 1983. 527 p.
9. Ivanov I.N., Kuznetsova G.P. Features of the tool equipped with elements from high-speed steels. *Svarochnoye proizvodstvo*. 2014. No 2, pp. 43–45. (In Russian).
10. Mozgovoy I.G., Schneider E.A. The influence of the thermal cycle of manufacturing a bimetallic cutting tool on the structure and mechanical characteristics of the fusion zone. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*. 2011. No 4, pp. 46–49. (In Russian).
11. Afanasieva L.E., Barabonova I.A., Barchukov D.A. Uprochnyayushchiye tekhnologii i pokrytiya v mashinostroyenii: uchebnoye posobiye. [Strengthening technologies and coatings in engineering: textbook]. Tver: Tver State Technical University. 2017. 116 p.
12. Barchukov D.A. Technological strength as a criterion for the performance of bimetallic compounds obtained by surfacing high-speed steels on structural steels. *Mechanics and physics of processes on the surface and in the contact of solids, parts of technological and power equipment*. 2015. No 8, pp. 93–98.
13. Chaus A.S., Latyshev I.V. The influence of vanadium, titanium and niobium on the formation of the structure of cast tungsten-molybdenum high-speed steel. *Fizika metallov i metallovedeniye*. 1999. No 5, pp. 50–57. (In Russian).
14. Yulmaz A. Microstructural analysis of a new cast high-speed steel alloyed with niobium. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*. 2012. No 7, pp. 28–32. (In Russian).
15. Kremnev L.S. The theory of doping and the creation on its basis of heat-resistant tool steels and alloys of optimal composition. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*. 2008. No 11, pp. 18–28. (In Russian).
16. Kremnev L.S., Onegina A.K., Vinogradova L.A. Features of transformations, structure and properties of molybdenum high-speed steels. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*. 2009. No 12, pp. 13–19. (In Russian).

ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА, ЭКОНОМИЧНОСТИ И ЭКОЛОГИЧНОСТИ ИЗНОШЕННЫХ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ НОВЫМИ ПРИЕМАМИ ИХ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

А.В. ДУНАЕВ¹, д-р техн. наук, И.Б. ТРИШКИН², д-р техн. наук

¹Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ 109428, Москва,
1-й Институтский проезд, 5, e-mail: dunaev135@mail.ru

²Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева
390044, Рязань, ул. Костычева, 1, e-mail: iv.trishckin@yandex.ru

© Дунаев А.В., Тришкин И.Б., 2019

Повышение надежности, экономичности особенно актуально для изношенных машин и оборудования. Кроме качественного обслуживания, стандартных работ по исключению загрязнения масел агрегатов этому служат новые воздействия на агрегаты машин. Данная работа посвящена краткому описанию апробаций современных инноваций в техническом сервисе. Триботехническая обработка двигателей внутреннего сгорания (ДВС) серпентиновыми порошками позволяет проводить «безразборный» ремонт любых агрегатов машин и оборудования с рентабельностью до 1200 %, с повышением ресурса до трех раз. Другая инновация – подача в картерные масла агрегатов электрических зарядов с источников напряжения 50 В. Они повышают прочность масляной пленки, в 3 раза уменьшают трение и износ, на 3...7 % расход топлива, повышают ресурс агрегатов. Активаторы топлив уменьшают их расход на 25...32 %. Третья инновация – уникальная водотопливная эмульсия, улучшающая экологию ДВС и их экономичность на 9 %.

Ключевые слова: триботехнический состав, масла, электрзаряды, коэффициент трения, износ, активация и расход топлива.

ВВЕДЕНИЕ

Кроме качественного сервиса, обязательных стандартных работ по предотвращению загрязнения масел агрегатов, воздуха в двигателях внутреннего сгорания (ДВС), повышению надежности, экономичности, экологичности изношенных машин и оборудования способствуют инновационные воздействия на их агрегаты. Широкое применение нашла рожденная 80 лет назад в СССР триботехническая обработка машин, оборудования порошками геомодификаторов трения (ГМТ) – гидросиликатами магния $\{Mg_6[Si_4O_{10}](OH)_8\}$. С их помощью проводят «безразборный» ремонт узлов машин, оборудования, работающих с маслами, топливом, повышают ресурс объектов обработки до трех раз, их функционирование до номинала, сокращают расход топливо-смазочных материалов и эксплуатационных затрат с рентабельностью 300...500 до 1200 % [1, 2].

В настоящее время успешно развивается электрическая обработка смазочных и гидравлических масел, уменьшающая трение во всех сопряжениях, расход топлива в ДВС, повышающая ресурс узлов, агрегатов. К наиболее эффективным средствам снижения расхода топлив в ДВС следует отнести также активатор моторных топлив профессора Воробьева Ю.В. по патенту РФ № 2411074. Все описанные инновации актуальны для многих отраслей промышленности. Цель настоящей работы – краткое описание апробаций современных инноваций в техническом сервисе, особенно актуальных для изношенных машин и оборудования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе изложены триботехнические, электрические и механохимические приемы воздействий на поверхности трения, на смазочные масла и моторные топлива.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Приведем обобщение результатов 30-летнего применения геомодификаторов трения (ГМТ) или ремонтно-восстановительных триботехнических составов в нашей стране и за рубежом. Они инициируют в эксплуатации постепенное наращивание на поверхностях трения антиизносных, алмазоподобных, маслофильных покрытий из углерода толщиной от нескольких микрометров до 600, а уникально – до 1000 мкм (рис. 1). ГМТ-покрытия до трех раз повышают ресурс узлов трения, немного – экономичность, заметно – экологичность любых агрегатов машин и оборудования, работающих с маслами. ГМТ не сложны в приготовлении, применении (без технологического оборудования, персоналом средней квалификации), экологичны, дешевы [1, 2].

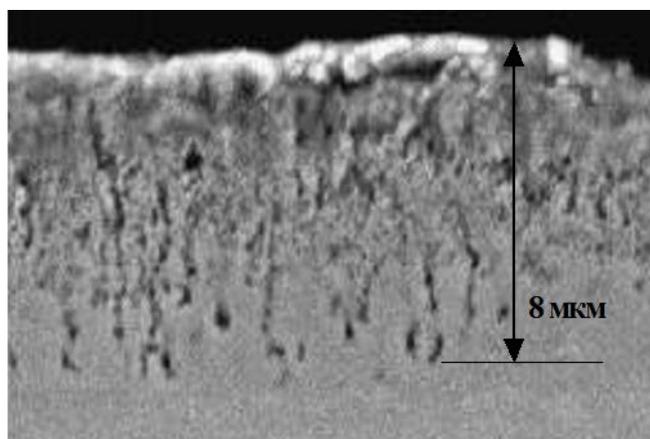


Рис. 1. Поперечный шлиф гильзы цилиндра дизеля 16V280Z тепловоза DF-11 с пробегом 150 тыс. км после двукратной обработки АРТ-трибосоставами О.Г. Павлова

Условия, особенности применения ГМТ, механизм образования покрытий, их уникальные физико-механические свойства и состав, способность наращиваться даже на сухую поверхность, результаты «безразборного ремонта» за последние 30 лет в России, Японии, Китае, Финляндии, Египте, Греции, в других странах описаны достаточно широко [1, 2]. Уникальные особенности ГМТ-покрытий таковы: зеркальная чистота поверхности с шероховатостью $Ra \approx 0,07$ мкм [2, 3], прозрачность, высокая твердость ($HV \approx 1100$ кгс/см²); оранжево-золотистый цвет, стойкость против травления раствором азотной кислоты; содержание углерода до 90 % и ускорение образования с углеродной сажей. В мире известны органические, неорганические, комплексные триботехнические составы, но по соотношению цена/качество у ГМТ нет конкурентов.

Результаты сравнительных испытаний некоторых трибосоставов в Наноцентре ФГБНУ ГОСНИТИ на трибометре TRB-S-DE швейцарской фирмы CSM Instruments со стальной парой трения «палец – диск» в режиме ступенчатого нагружения до давления 228 МПа при постоянной скорости скольжения 100 см/с приведены на рис. 2 [2]. Показано совпадение антифрикционных свойств трибосоставов ЦНТ и МС-2, хорошие свойства составов КАРАТ. А ГМТ «Сарановский» выявлен лучшим из серпентиновых

и приблизил трибосвойства масла М-10Г2К класса СС по АРІ к свойствам масла фирмы Mobil [2].

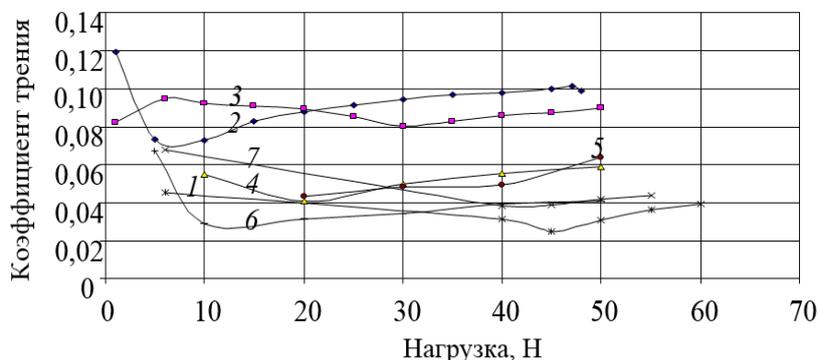


Рис. 2. Коэффициенты трения пары «палец – диск»: в масле Mobil API SJ/SL SAE 05W-30 (1), в масле М-10Г2К (ЗАО «Роснефть») (2) и с введенными по 1 % трибосоставами: профилактический КАМП (3), серпентиновые ЦНТ (4), МС-2 (5), «Сарановский» (6) и наноалмазные КАРАТ-М и КАРАТ-5 (7)

Для улучшения работы агрегатов расширяется применение электровоздействия на их масла. Так, в Украинской государственной академии железнодорожного транспорта [4] освоена технология обработки технических масел электрическим полем напряженностью до 1000 В/см. При этом толщина и прочность масляной пленки, ее нагрузочная способность вырастают на 30...40 %, трение и износ уменьшаются до трех раз, давление масла в дизеле повышается на $(0,5...0,7) \cdot 10^5$ Па. В результате значительная часть тяжелой техники Донбасса снабжена средствами электростатической обработки масел в дизелях, гидросистемах машин, рекомендованными академией.

Позднее в ООО «ЛИК» было апробировано и внедрено на 300 объектах более простое средство, условно названное «электронный регулятор трения» (ЭРТ). Это недорогой (75...100 руб.) преобразователь напряжения с +12 В на +50 В [5]. Он обуславливает эмиссию в масла электрорядов с деталей, омываемых маслом и изолированных от «массы» агрегата. С включением ЭРТ повышается, но быстро исчезает дымность дизелей, усиливается загрязненность маслофильтров, масла осветляются.

Первые независимые испытания ЭРТ проведены в Таллинском технологическом университете на машине трения «Тимкен» [2]. Они показали, что даже с плохо смачивающим сталь касторовым маслом ЭРТ обусловил хорошие трибосвойства сопряжений трения. В 2012 г. в Хельсинки с ЭРТ проведены стендовые испытания дизельного автомобиля AUDI A4 с имитацией скорости движения 85 и 142 км/ч. Было показано, что удельный расход топлива снизился на 24,2 % на малой скорости и на 4,9 % на высшей. В стендовых испытаниях дизеля в форсированных режимах экономия топлива составила лишь 3,2 %.

Кандидатом технических наук А.Ю. Шабановым по 272 параметрам испытан с ЭРТ ДВС ВА3-2108: механические потери уменьшились на 5,5 %, расход топлива на 4,3 %, температура ОГ на 6...10 °С, содержание СО и СН на 19 %, но выход NO_x вырос на 6,5 %. Эффективный КПД повысился на 4,6 %, мощность на 1 % [2]. Эффективность ЭРТ проявлялась лишь через несколько часов, а после его отключения показатели ДВС быстро нивелировались.

В ГОСНИТИ проведены испытания ЭРТ на автомобиле ВАЗ-2131М «Нива». На трекe расход бензина с ЭРТ снизился на 3 %, а в сравнении с городской трассой – на 9 %. Доктор технических наук А.В. Шарифуллин показал, что на трассе Чистополь – Казань и обратно расход топлива автомобилем Хундай АХ 35 с ЭРТ снижался с 11 до 7,5...8,5 л/100 км [2].

В ООО «РИП» на основании десятилетних испытаний сначала проводят трибообработку агрегатов составом «Fe-do», а затем подключают ЭРТ [5]. Так, после ГМТ-обработки 25 автомобилей в пробеге Санкт-Петербург – Петрозаводск и обратно расход топлива снижался на 5...7 %, с ЭРТ еще на 2...3 %, т.е. всего на 7...10 %. После трибообработки агрегатов трансмиссии и подключения к ним ЭРТ расход топлива снижался еще на 1,5...3 %. Так, на автомобиле Ford F-150 с пробегом 250 тыс. км расход бензина составлял 15, а после трибообработки ДВС с помощью ГМТ марки «Fe-do» и с ЭРТ он стал 13,7 л/100 км. С трибообработкой трансмиссии и с подключением ЭРТ расход снизился до 13,2 л/100 км.

Испытания промышленных преобразователей на +50 В выполнены инженером В.Г. Рыжовым на бензиновом автомобиле АУДИ 100 и дизельном АУДИ А4. В пробеге 2250 км с преобразователем экономия составила 8...12 %, а обратно с прицепом (400...450 кг) она повысилась до 16...18 %. Далее экономия оставалась 8...10, 12 %, расход топлива в смешанном режиме составлял 8,5...8,6, а без преобразователя 9,6...9,8 л/100 км. На дизельном автомобиле с преобразователем пройдена 41 тыс. км. После трибообработки ДВС расход топлива составлял 4,2...4,3 л/100 км, а с преобразователя снизился на 11 % [2]. Преобразователь более эффективен со старыми маслами, и тем больше, чем жиже масло. Если ДВС не прогреет, то тогда при высокой скорости движения машины экономии не наблюдается.

В Наноцентре ГОСНИТИ проведены испытания ЭРТ на трибометре TRB-S-DE при вводе в масло М-10Г2К электрических зарядов с медного, алюминиевого, оловянного, цинкового, железного и угольного электродов [2]. Выявлено значительное снижение трения при малых нагрузках: с цинковым электродом при нагрузке 38 МПа коэффициент трения снизился с 0,096 до 0,037 (рис. 3).

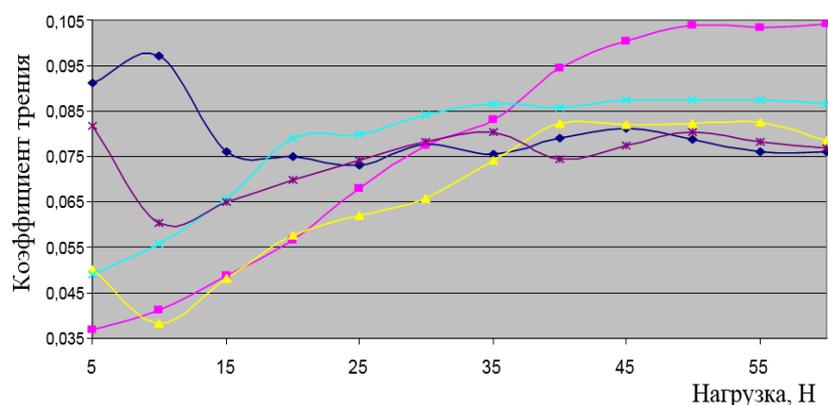


Рис. 3. Результаты испытаний ЭРТ с разными электродами:

- ◆ масло без ЭРТ
- регулятор + олово
- ▲ регулятор + цинк
- × регулятор + сталь
- ★ регулятор + уголь

Следующая разработка, которая эффективно снижает расход топлив – механохимический активатор профессора Воробьева Ю.В. по патенту № 2411074 [6]. В испытаниях ДВС КамАЗ-740, ЗМЗ-406, ЯМЗ-236, в эксплуатационных испытаниях

профессором десятка активаторов на самых разных легковых автомобилях расход топлив с активаторами снижался на 20..32 %. Причина этому, что доказано в Центре нелинейной волновой механики при ИМАШ РАН, связана с повышением теплотворности бензина на 28 % из-за деструкции их углеводородов (рис. 4). По данным исследований, с помощью хроматографа Кристаллюкс-4000М Тамбовской лаборатории судебно-медицинской экспертизы при обработке происходит разрушение тяжелых и образование легких фракций бензина. После малозатратной механохимической деструкции в активаторе затраты тепла сгорания на разрыв молекул на отдельные атомы резко уменьшаются и вне высвобождается большая часть тепла сгорания.

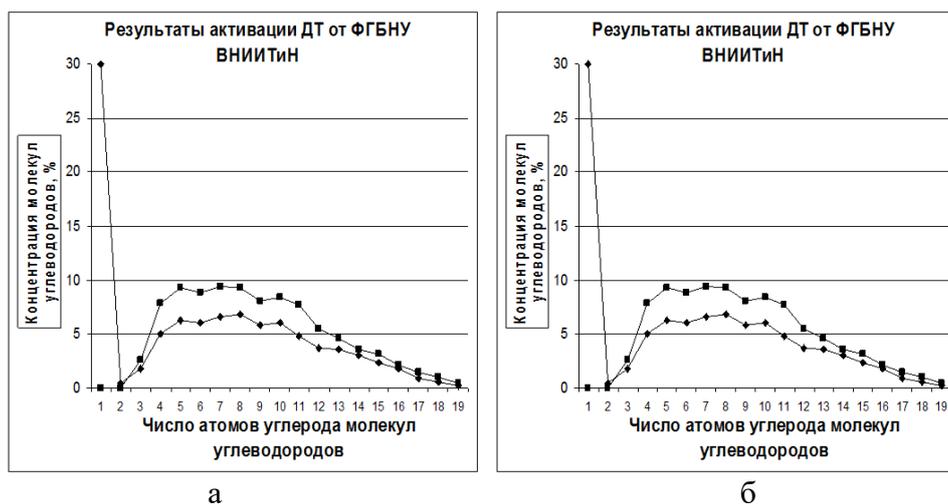


Рис. 4. Деструкция компонентов дизельного топлива активатором:
 а – дизельное топливо у разработчиков активатора;
 б – то же (компания «Лукойл»¹)

Активатор проверен 150 хроматограммами 8 марок бензинов, десятков марок дизельных топлив (ДТ), контролем их расхода и вредных веществ в отработавших газах [7, 8]. Хроматограммы активированных ДТ и бензинов разных поставщиков показали уменьшение доли тяжелых углеводородов (рис. 4) и образование легких: гексана, гептана, 3метил-пентана до 37 %, снижение содержания серы с 0,032 до 0,015 %, смол с 7,4 до 0,8 мг/100 мл. В бензине содержание октаноопределяющего толуола повышалось до 16 %, а в авиакеросине – нонана и декана – до 21 % [7, 8]. Активатор апробирован и на биотопливе.

В Rochester Institute of Technology (США) показано уменьшение в активированных топливах содержания серы до 50 %, смол в 7...9 раз, а выбросов NO – до 17 %, NO₂ – до 14 %, а CO – до 49 %. Подтверждением активации явилось увеличение объема ДТ на 2,49 % [7, 8].

Особенность активатора – необратимость модификации топлив. Под влиянием долгоживущих радикалов модификация активированных топлив продолжается и в хранении. А ввод доли активированного в неактивированное заметно повышает в смеси долю активированного:

в товарное топливо вводили 4,6 % активированного, через 15 мин в смеси образовывалось 12 % легких фракций;

¹ Примечание автора: по оси абсцисс обоих графиков отложено число атомов углерода в цепи молекул углеводородов от C₆H₁₄ до C₂₄H₅₀.

аналогично вводили 6,9 % легких фракций, а в смеси создавалось их 39 %; но после ввода 9,2 % легких фракций их выявлено лишь 27 %; после ввода 50 % активированного топлива легких фракций выявлено еще меньше [8].

С помощью активатора профессора Воробьева Ю.В. создана стабильная водотопливная эмульсия из 28 % воды и 65 % дизельного топлива, уменьшающая его расход на 9 % и резко улучшающая экологию ДВС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение длительно и обстоятельно апробированных несложных приемов сервиса инновационными воздействиями на агрегаты машин и оборудования заметно повышает их надежность, ресурс, экономичность, экологичность, в 1,5 раза уменьшает затраты на их использование, обслуживание и ремонт.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зуев В.В. Конституция, свойства минералов и строение земли (энергетические аспекты) СПб: Наука. 2005. 400 с.
2. Дунаев А.В., Филиппова Е.М. Нетрадиционная триботехника для повышения ресурса автотракторной техники. Итоги 25-летнего развития: монография. М.: ГОСНИТИ. 2017. 252 с.
3. Yuansheng J., Shenghua L. Superlubricity of in situ generated protective layer on worn metal surfaces in presence of Mg₆Si₄O₁₀(OH)₈ // *Superlubricity*. Elsevier Science BV, 2007. Pp. 445–469.
4. Воронин С.В., Дунаев А.В. Влияние электрического и магнитного поля на механизм действия присадок к маслам // *Трение и износ*. 2015. Т. 36. № 1. С. 41–49.
5. Патент РФ № 2679331 Способ повышения работоспособности новых и изношенных узлов и агрегатов машин и оборудования / Любимов Д.Н. и др. Заявл. 06.03.2018. Оpubл. 07.02.2019, Бюл. № 4.
6. Патент РФ № 2411074 Комбинированный статический смеситель-активатор / Воробьев Ю.В., Тетерюков В.Б. Заявл. 01.07.2009. Оpubл. 10.02.2011, Бюл. № 4.
7. Воробьев Ю.В. Основы теории механоактивации жидких сред // *Вестник Тамбовского технического университета*. 2013. Т. 19. № 3. С. 608–613.
8. Воробьев Ю.В., Кузьмин А.П. Химическое действие гидроудара на моторное топливо в активаторе // *Вестник Тамбовского технического университета*. 2014. Т. 20. № 1. С. 95–100.

IMPROVING RESOURCE EFFICIENCY AND ENVIRONMENTAL PERFORMANCE OF USED MACHINERY AND EQUIPMENT WITH NEW METHODS OF MAINTENANCE

A.V. DUNAEV¹, Dr. Sci., I.B. TRISHCKIN², Dr. Sci.

¹Federal research center of agricultural engineering VIM, 5,1st Institutsky proezd, 109428, Moscow, Russian Federation, e-mail: dunaev135@mail.ru

²Ryazan state agrotechnological University named after P.A. Kostychev, 1, Kostychev str., 390044, Ryazan, Russian Federation, e-mail: iv.trishckin@yandex.ru

Improving reliability, efficiency is especially important for worn-out machines and equipment. In addition to high-quality service, standard works to eliminate contamination of oil units', this is the new impact on the machine units. This work is devoted to a brief

description of approbations of modern innovations in technical service. Tribotechnical treatment of internal combustion engines (ICE) with serpentine powders has been expanding. They carry out «CIP» repair of any units of machinery and equipment with a profitability up to 1200 %, with an increase in resource up to 3 times. Another innovation is the supply of electric charges to crankcase oils from 50 V voltage sources. They increase the strength of the oil film, reduce friction, wear by 3 to 7 % fuel consumption, increase the life of the units. And fuel activators reduce their consumption by 25...32 %. The special innovation is a unique water-fuel emulsion that dramatically improves the ecology of ICE, and their efficiency by 9 %.

Keywords: tribotechnical composition, oils, electric charges, coefficient of friction, wear, activation and fuel consumption.

REFERENCES

1. Zuev V.V. Konstituziya, svoystva mineralov i stroenie zemli (energeticheskie aspekty) [Constitution, properties of minerals and structure of the earth (energy aspects)]. Sankt-Peterburg: Nauka. 2005. 400 p.

2. Dunaev A.V., Filippova E.M. Netraditsionnaya triboteshnika dlya povisheniya resursa avtotraktornoj teshniki. Itogi 25-letnego razvitiya. Monografiya. [Non-traditional tribology to increase the service life of tractors. Results of 25 years of development. Monograph] M.: GOSNITI. 2017. 252 p.

3. Yuansheng J., Shenghua L. Superlubricity of in situ generated protective layer on worn metal surfaces in presence of Mg₆Si₄O₁₀(OH). 8 *Superlubricity*. Elsevier Science BV, 2007, pp. 445–469.

4. Voronin S.V., Dunaev A.V. Influence of electric and magnetic field on the mechanism of action of additives to oils. *Trenie i iznos*. 2015. V. 36, No 1, pp. 41–49. (In Russian).

5. Patent RF 2679331. *Sposob povisheniya rabotosposobnosti novih i iznoshennih uzlov i agregatov mashin i oborudovaniya* [A way to improve the performance of new and worn-out units and assemblies of machines and equipment] Lubimov D.N. [et al.]. Declared 06.03.2018. Published 07.02.2019. Bulletin No 4.

6. Patent RF 2411074. *Kombinirovanniy statiteskiy smesitel-aktivator* [Combined static mixtel-activator] Vorobiev Yu.V., Teterukov V.B. Declared 01.07.2009. Published 10.02.2011. Bulletin No 4.

7. Vorobiev Yu.V. Fundamentals of the theory of mechanoactivation of liquid media. *Vestnik Tambovskogo tekhnicheskogo universiteta*. 2014. V. 19, No 3, pp. 608–613. (In Russian).

8. Vorobiev Yu.V., Kuzmin A.P. Chemical effect of hydraulic shock on motor fuel in the activator *Vestnik Tambovskogo tekhnicheskogo universiteta*. 2014. V. 20, No 1, pp. 95–100. (In Russian).

ОБ ОДНОМ КРИТЕРИИ S -СИММЕТРИИ ФУНКЦИИ ТРЕХ ПЕРЕМЕННЫХ

Ал.Ан. ШУМ¹, канд. физ.-мат. наук,
А.М. ВЕТОШКИН², канд. техн. наук, Ан.Ал. ШУМ¹

¹Тверской государственной технический университет, 170026, Тверь,
наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: shum@tstu.tver.ru

²Мытищинский филиал Московского государственного технического университета
им. Н.Э. Баумана. 141005, Мытищи, ул. 1-я Институтская, 1, e-mail: vetkin@mgul.ac.ru

© Шум Ал.Ан., Ветошкин А.М., Шум Ан.Ал., 2019

Настоящая работа посвящена исследованию свойств функции плотности, определяющей распределение массы внутри детали. Рассматривается вопрос о переносе на случай функции трех переменных критерия s -симметрии, установленного ранее авторами для случая функции двух переменных. Доказана достаточность соответствующего критерия и приведен пример его применения.

Ключевые слова: функция плотности, масса, симметрия, s -симметрия, критерий s -симметрии, шар, сферические координаты, функция трех переменных.

ВВЕДЕНИЕ

В современном машиностроении используется широкий спектр технологий механической и физико-технической обработки деталей [1–12]. Характер распределения массы внутри обрабатываемой детали может иметь значение при выборе технологии в конкретных случаях. Поскольку распределение массы внутри детали определяет соответствующая функция плотности, то представляет интерес изучение свойств таких функций. В работах [13–17] рассматривались плоские детали (пластины [15]), распределение массы внутри которых определяют функции двух переменных, т.е. эти работы были посвящены изучению двухмерного случая. Настоящая статья продолжает исследования по изучению трехмерного случая, начатые в работе [18].

Функция двух переменных, определенная в круге радиуса R , рассматривалась в работах [13] и [14]. В статье [18] некоторые результаты из [13] были перенесены на случай функции трех переменных, определенной в шаре радиуса R . В настоящей работе рассматривается вопрос о переносе на этот случай критерия s -симметрии, установленного в [13] для функции двух переменных. Доказана достаточность предложенного критерия для функции трех переменных. Показано, как этот критерий позволяет установить s -симметрию функции $f_1(\rho, \varphi, \theta)$ из работы [18].

Рассматривается функция трех переменных $f(\rho, \varphi, \theta)$, заданная в сферической системе координат и определенная в шаре радиуса R . Функция $f(\rho, \varphi, \theta)$ называется s -симметричной, если она удовлетворяет условию

$$(s) \quad \text{при любом разбиении исходного шара } B \text{ на два полушара } B_1 \text{ и } B_2 \text{ выполнено равенство } \iiint_{B_1} f(\rho, \varphi, \theta) \rho^2 \sin \theta d\rho d\varphi d\theta = \iiint_{B_2} f(\rho, \varphi, \theta) \rho^2 \sin \theta d\rho d\varphi d\theta.$$

Значение интеграла $\iiint_{B_0} f(\rho, \varphi, \theta) \rho^2 \sin \theta d\rho d\varphi d\theta$, где B_0 – некоторая часть

исходного шара, называем *массой* этой части шара (обобщая тем самым случай, когда функция $f(\rho, \varphi, \theta)$ неотрицательна и понимается как плотность материала, из которого состоит рассматриваемый шар [19, 20]). Таким образом, условие (s) означает следующее: *любая плоскость, проведенная через центр шара, делит его на две части одинаковой массы.*

Переменные ρ и θ предполагаем меняющимися в следующих пределах: $0 \leq \rho \leq R$, $0 \leq \theta \leq \pi$. Переменная φ допускается произвольной, но предполагается, что по этой переменной функция $f(\rho, \varphi, \theta)$ имеет период 2π (это значит, что $f(\rho, \varphi, \theta) = f(\rho, \varphi + 2\pi, \theta)$ для любого φ и любых $\rho \in [0; R]$ и $\theta \in [0; \pi]$). Если изначально такая функция определяется только для значений аргумента φ из некоторого промежутка длиной 2π , то предполагается, что она автоматически продолжается до периодической (по переменной φ) с периодом 2π . Функцию углов сферической системы координат $F(\varphi, \theta)$ называем *центросимметричной*, если $F(\varphi, \theta) = F(\varphi - \pi, \pi - \theta)$ при любых значениях φ и любом $\theta \in [0; \pi]$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБОСНОВАНИЯ

Лемма. Пусть функция $f(\rho, \varphi, \theta)$ является непрерывной в шаре радиуса R и функция $F(\varphi, \theta) = \int_0^R f(\rho, \varphi, \theta) \rho^2 d\rho$ центросимметрична. Тогда функция $f(\rho, \varphi, \theta)$ является s -симметричной в шаре радиуса R .

Доказательство.

Пусть функция $F(\varphi, \theta) = \int_0^R f(\rho, \varphi, \theta) \rho^2 d\rho$ является центросимметричной.

Докажем, что функция $f(\rho, \varphi, \theta)$ является s -симметричной.

Через $B_{\alpha_1, \alpha_2}^{\beta_1, \beta_2}$ обозначаем часть шара, высекаемую пространственным углом:

$$\begin{cases} \alpha_1 \leq \varphi \leq \alpha_2 \\ \beta_1 \leq \theta \leq \beta_2. \end{cases}$$

Масса этой части шара равна

$$\begin{aligned} \iiint_{B_{\alpha_1, \alpha_2}^{\beta_1, \beta_2}} f(\rho, \varphi, \theta) \rho^2 \sin \theta d\rho d\varphi d\theta &= \int_{\beta_1}^{\beta_2} d\theta \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} d\varphi \int_0^R f(\rho, \varphi, \theta) \rho^2 \sin \theta d\rho = \\ &= \int_{\beta_1}^{\beta_2} \sin \theta d\theta \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} d\varphi \int_0^R f(\rho, \varphi, \theta) \rho^2 d\rho = \int_{\beta_1}^{\beta_2} \sin \theta d\theta \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} F(\varphi, \theta) d\varphi. \end{aligned}$$

Симметричной относительно начала координат для части шара $B_{\alpha_1, \alpha_2}^{\beta_1, \beta_2}$ будет часть шара $B_{\alpha_1 + \pi, \alpha_2 + \pi}^{\pi - \beta_2, \pi - \beta_1}$. Найдем массу этой части шара:

$$\begin{aligned}
& \iiint_{B_{\alpha_1+\pi, \alpha_2+\pi}^{\pi-\beta_2, \pi-\beta_1}} f_1(\rho, \varphi, \theta) \rho^2 \sin \theta d\rho d\varphi d\theta = \int_{\pi-\beta_2}^{\pi-\beta_1} d\theta \int_{\alpha_1+\pi}^{\alpha_2+\pi} d\varphi \int_0^R f(\rho, \varphi, \theta) \rho^2 \sin \theta d\rho = \\
& = \int_{\pi-\beta_2}^{\pi-\beta_1} \sin \theta d\theta \int_{\alpha_1+\pi}^{\alpha_2+\pi} d\varphi \int_0^R f(\rho, \varphi, \theta) \rho^2 d\rho = \int_{\pi-\beta_2}^{\pi-\beta_1} \sin \theta d\theta \int_{\alpha_1+\pi}^{\alpha_2+\pi} F(\varphi, \theta) d\varphi = \left\{ \begin{array}{l} x = \varphi + \pi \\ \varphi = x - \pi \\ d\varphi = dx \end{array} \right\} = \\
& = \int_{\pi-\beta_2}^{\pi-\beta_1} \sin \theta d\theta \int_{\alpha_1+2\pi}^{\alpha_2+2\pi} F(x - \pi, \theta) dx = \left\{ \begin{array}{l} y = \pi - \theta \\ \theta = \pi - y \\ d\theta = -dy \end{array} \right\} = - \int_{\beta_2}^{\beta_1} \sin(\pi - y) dy \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} F(x - \pi, \pi - y) dx = \\
& = \int_{\beta_1}^{\beta_2} \sin y dy \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} F(x - \pi, \pi - y) dx = \int_{\beta_1}^{\beta_2} \sin \theta d\theta \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} F(\varphi - \pi, \pi - \theta) d\varphi = \int_{\beta_1}^{\beta_2} \sin \theta d\theta \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} F(\varphi, \theta) d\varphi.
\end{aligned}$$

Таким образом, массы противоположных частей шара $B_{\alpha_1, \alpha_2}^{\beta_1, \beta_2}$ и $B_{\alpha_1+\pi, \alpha_2+\pi}^{\pi-\beta_2, \pi-\beta_1}$ одинаковы. Пусть теперь исходный шар разбит на два полушара. Полушар может быть представлен как объединение (быть может, бесконечное) частей вида $B_{\alpha_1, \alpha_2}^{\beta_1, \beta_2}$. Каждой такой части одного полушара отвечает симметричная часть другого, имеющая точно такую же массу. Следовательно, два полушара также имеют равные массы. Этим доказано, что функция $f(\rho, \varphi, \theta)$ является s -симметричной.

Доказанная лемма устанавливает достаточный критерий s -симметрии функции трех переменных. Этот критерий может быть использован для доказательства s -симметрии функции $f_1(\rho, \varphi, \theta) = \frac{20}{5 \sin \frac{\varphi}{2} + 1} \left(\rho \sin \frac{\varphi}{2} + \rho - \rho^2 \right)$ в шаре радиуса $R = 1$. Эта функция

рассматривалась в лемме 1 из работы [14] как пример функции, которая в шаре радиуса $R = 1$ является s -симметричной, но не является c -симметричной (функция, определенная в шаре радиуса R , называется c -симметричной, если при заданной ею плотности центр масс шара [19, 20] оказывается в центре этого шара). Вот как можно подтвердить факт s -симметрии функции $f_1(\rho, \varphi, \theta)$ в шаре радиуса $R = 1$ при помощи установленного критерия:

$$\begin{aligned}
F(\varphi, \theta) &= \int_0^1 f_1(\rho, \varphi, \theta) \rho^2 d\rho = \int_0^1 \left(\frac{20}{5 \sin \frac{\varphi}{2} + 1} \left(\rho \sin \frac{\varphi}{2} + \rho - \rho^2 \right) \right) \rho^2 d\rho = \\
&= \int_0^1 \left(\frac{20}{5 \sin \frac{\varphi}{2} + 1} \left(\rho^3 \sin \frac{\varphi}{2} + \rho^3 - \rho^4 \right) \right) d\rho = \left[\frac{20}{5 \sin \frac{\varphi}{2} + 1} \left(\frac{\rho^4}{4} \sin \frac{\varphi}{2} + \frac{\rho^4}{4} - \frac{\rho^5}{5} \right) \right]_0^1 = \\
&= \frac{20}{5 \sin \frac{\varphi}{2} + 1} \left(\frac{1}{4} \sin \frac{\varphi}{2} + \frac{1}{4} - \frac{1}{5} \right) = \frac{20}{5 \sin \frac{\varphi}{2} + 1} \cdot \frac{1}{20} \cdot \left(5 \sin \frac{\varphi}{2} + 1 \right) = 1.
\end{aligned}$$

Поскольку функция $F(\varphi, \theta)$ оказалась постоянной (равной единице), то она очевидно является центросимметричной, а значит, в силу доказанного критерия, функция $f_1(\rho, \varphi, \theta)$ является s -симметричной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье [13] было введено понятие s -симметрии для функций двух переменных, определенных в круге радиуса R , и указан некоторый критерий такой симметрии. В работе [18] понятие s -симметрии естественным образом было перенесено на случай функций трех переменных, определенных в шаре радиуса R . В данной работе предложен достаточный критерий s -симметрии для этого случая, представляющий собой некоторый аналог критерия из [13]. Полезность этого критерия подтверждена примером.

ЛИТЕРАТУРА

1. Яньюшкин А.С., Шоркин В.С. Контактные процессы при электроалмазном шлифовании. М.: Машиностроение-1. 2004. 230 с.
2. Артамонов Б.А., Волков Ю.С., Дрожжалова В.И., Седыхин Ф.В., Смоленцев В.П., Ямпольский В.М. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: учеб. пособие. В 2 т. М.: Высшая школа. 1983. Т. 1. 247 с. Т. 2, 208 с.
3. Вороничев Н.М., Тартаковский Ж.Э., Генин В.Б. Автоматические линии из агрегатных станков. М.: Машиностроение. 1979. 487 с.
4. Немилов Е.Ф. Электроэрозионная обработка материалов. Л.: Машиностроение. 1983. 160 с.
5. Ящерицын П.И., Фельдштейн Е.Э., Корниевич М.А. Теория резания. Мн.: Новое знание. 2006. 512 с.
6. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. М.: Машиностроение. 1993. 336 с.
7. Подураев В.Н. Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания. М.: Машиностроение. 1977. 303 с.
8. Дальский А.М., Гаврилюк В.С. Механическая обработка материалов: учеб. для вузов. М.: Машиностроение. 1981. 266 с.
9. Силин С.С. Метод подобия при резании материалов. М.: Машиностроение. 1979. 152 с.
10. Трент Е.М. Резание металлов. М.: Машиностроение. 1980. 263 с.
11. Старков В.К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве. М.: Машиностроение. 1989. 297 с.
12. Этин А.О. Кинематический анализ и выбор эффективных методов обработки лезвийным инструментом. М.: Машгиз. 1953. 173 с.
13. Шум А.А. О симметрии функций, определенных в круге // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2014. № 1 (25). С. 3–8.
14. Шум А.А. Замечание об s -симметричных функциях // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2015. № 1 (27). С. 3–6.
15. Шум А.А. О центрах симметрии функции двух переменных // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2016. № 2 (30). С. 14–18.
16. Шум А.А. О центрах симметрии функции, определенной в выпуклой области плоскости // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2017. № 1 (31). С. 19–22.

17. Шум А.А. Симметрическая линия функции двух переменных // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2017. № 2 (32). С. 103–105.

18. Шум Ал.Ан., Ветошкин А.М., Шум Ан.Ал. Замечание о симметрии функций, определенных в шаре // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2019. № 3 (3). С. 38–46.

19. Письменный Д.Т. Конспект лекций по высшей математике (полный курс). М.: АЙРИС ПРЕСС. 2007. 604 с.

20. Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. М.: ФИЗ-МАТЛИТ. 2001. Т. 3. 662 с.

ON ONE CRITERION OF S-SYMMETRY OF A FUNCTION OF THREE VARIABLES

Al.An. SHUM¹, Cand. Sci., A.M. VETOSHKIN², Cand. Sci., An.Al. SHUM¹

¹ Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: shum@tstu.tver.ru

² Mytishchi branch of Moscow State Technical University named after N.E. Bauman.
141005, Mytishchi, st. 1st Institute, 1, e-mail: vetkin@mgul.ac.ru

This paper is devoted to the study of the properties of the density function, which determines the mass distribution inside the part. In a previous paper, the authors introduced the notion of s -symmetry for the functions of three variables defined in a ball of radius R . The question of the transfer to the case of the function of three variables of the s -symmetry criterion set earlier for the function of two variables is considered. The sufficiency of the corresponding criterion is proved and an example of its application is given.

Keywords: density function, mass, symmetry, s -symmetry, s -symmetry criterion, ball, spherical coordinates, three-variable function.

REFERENCES

1. Yanushkin A.S., Shorkin V.S. Contact processes in electro-diamond grinding. Moscow: Mashinostroenie-1. 2004. 230 p.

2. Artamonov B.A., Volkov Yu.S., Drozhzhalova V.I., Sedykhin F.V., Smolentsev V.P., Yampolsky V.M. Electrophysical and electrochemical methods of processing materials: Uchebnoe posobie. In 2 v. Moscow: Vysshaja shkola. 1983. V. 1, 247 p. V. 2, 208 p.

3. Voronichev N.M., Tartakovskiy J.E., Genin V.B. Automatic lines of modular machines. Moscow: Mashinostroenie. 1979. 487 p.

4. Nemilov E.F. Electroerosion treatment of materials. Leningrad: Mashinostroenie. 1983. 160 p.

5. Yastcheritsyn P.I., Feldshtein E.E., Korniewicz M.A. Theory of cutting. Minsk: Novoe znanie. 2006. 512 p.

6. Vereschaka A.S. The performance of the cutting tool with wear-resistant coatings. Moscow: Mashinostroenie. 1993. 336 p.

7. Poduraev V.N. Automatically adjustable and combined cutting processes. Moscow: Mashinostroenie. 1977. 303 p.

8. Dalskiy A.M., Gavrilyuk, V.S., Mechanical treatment of materials: uchebnik dlya vuzov. Moscow: Mechanical Engineering. 1981. 266 p.

9. Silin S.S. Method of similarity when cutting materials. Moscow: Mashinostroenie. 1979. 152 p.
10. Trent E.M. Metal cutting. Moscow: Mashinostroenie. 1980. 263 p.
11. Starkov V.K. Cutting processing. Stability and quality management in automated production. Moscow: Mashinostroenie. 1989. 297 p.
12. Etin A.O. Kinematic analysis and selection of effective methods of processing with a climbing tool. Moscow: Mashgiz. 1953. 173 p.
13. Shum A.A. On the symmetry of the functions defined in the circle // *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2014. № 1 (25), pp. 3–8. (In Russian).
14. Shum A.A. The comment about s -symmetric functions // *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2015. № 1 (27), pp. 3–6. (In Russian).
15. Shum A.A. About the centers of symmetry of a function of two variables // *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2016. № 2 (30), pp. 14–18. (In Russian).
16. Shum A.A. About the centers of symmetry of a function defined in a convex domain of the plane // *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2017. № 1 (31), pp. 19–22. (In Russian).
17. Shum A.A. Symmetric line of a function of two variables // *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2017. № 2 (32), pp. 103–105. (In Russian).
18. Shum A.I., Vetoshkin A.M., Shum A.N. A note on the symmetry of functions defined in a ball // *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskiye nauki»*. 2019. № 3 (3), pp. 38–46 (In Russian).
19. Pismennyi D.T. Lecture notes on higher mathematics (full course). Moscow: AIRIS PRESS. 2007. 604 p.
20. Fichtenholz G.M. Course of differential and integral calculus. Moscow: FIZMATLIT. 2001. V. 3. 662 p.

СПОСОБ УСТАНОВКИ ЗАГОТОВКИ НА ЦЕНТРАХ ТОКАРНОГО СТАНКА

А.П. АРХАРОВ, канд. техн. наук, С.С. МИТЮШИН

Тверской государственной технический университет, 170026, Тверь,
наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: mitiushin.serega@yandex.ru

© Архаров А.П., Митюшин С.С., 2019

Приведен способ установки заготовки на центрах токарного станка. В этом способе устанавливают механизированный патрон с переменным движением кулачков на шпиндель станка. Устанавливают передний упорный центр в патрон, а задний упорный центр – в пиноль задней бабки станка. Устанавливают заготовку вала центровыми отверстиями на передний и задний упорные центры. Далее осуществляют прижим кулачков к закрепляемой поверхности заготовки, а после выполнения упомянутого прижима всеми кулачками ими одновременно закрепляют заготовку. Способ позволяет повысить производительность и точность установки. Он может быть использован на машиностроительных предприятиях при автоматической загрузке, разгрузке и перестановке заготовок в виде валов на технологическом оборудовании.

Ключевые слова: заготовка, вал, способ, установка, автоматизация, станок, центр.

ВВЕДЕНИЕ

В составе изделий машиностроения, в том числе и станкостроения, часто встречаются валы. Наибольшее распространение получили ступенчатые валы средних размеров. Основными базами подавляющего большинства валов являются поверхности их опорных шеек. Однако использование их в качестве технологических баз для обработки наружных поверхностей, как правило, затруднено, особенно при условии сохранения единства баз, что очень важно при автоматизации технологического процесса. Поэтому при изготовлении валов на большинстве операций, в том числе и токарных, за технологические базы применяют поверхности центровых отверстий.

Существуют различные способы установки заготовок валов на центры станков. Среди них известен способ установки заготовок, в котором устанавливают ершовый упорный центр в шпиндель станка, а ершовый упорный задний центр – в пиноль задней бабки. Затем устанавливают заготовку на упомянутые центры [1]. Применение рифленых центров позволяет вести обработку без поводка. Однако установка на рифленые центры не обеспечивает высокой точности ввиду большого радиального биения (до 0,5 мм) и допускает только однократное использование центровых гнезд в качестве базы вследствие повреждения их при первой установке.

При обработке валов с одной установкой на проход по всей длине детали применяют специальные торцовые поводковые центры [2]. Ввиду наличия в упомянутой конструкции центра поводковой шайбы отпадает необходимость применения поводкового устройства. Однако при такой установке от зубьев поводковой шайбы остаются следы на торце детали, что снижает качество валов.

Отмеченных выше недостатков лишен способ установки валов на центры токарного станка [3]. Он заключается в том, что устанавливают поводковый патрон на шпиндель станка, устанавливают упорные центры в шпиндель станка и в пиноль задней бабки. Затем устанавливают хомутик на вал, а вал – на упорные центры. Однако размещение и закрепление хомутика на валу, а затем его снятие снижают

производительность установки и препятствуют автоматизации загрузки и разгрузки технологического оборудования. Задачей являлась разработка способа установки вала на центры станка, в котором для передачи крутящего момента от шпинделя к валу вместо малопроизводительного поводкового устройства использовалось бы более совершенное средство.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе использовался структурный анализ известных способов установки валов на центрах металлорежущего оборудования, а при разработке нового способа применен принцип сохранения при закреплении заготовки того положения, которое она приняла при базировании.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Решение поставленной задачи достигнуто в разработанном способе установки вала на центры токарного станка. В этом способе устанавливают механизированный патрон с переменным движением кулачков на шпиндель станка, передний центр – в упомянутый патрон, задний упорный центр – в пиноль задней бабки станка, вал – на упомянутые центры. Затем кулачки патрона прижимают к валу, а после завершения упомянутого прижима всех кулачков ими одновременно закрепляют вал за наружную поверхность.

Сравнение разработанного способа с известным в [3] способом показывает следующее. В известном способе передачу к валу крутящего момента обеспечивают путем установок поводкового патрона на шпиндель, а хомутика на вал. В разработанном способе передачу упомянутого момента от шпинделя к валу обеспечивают установкой механизированного патрона с переменным движением кулачков и закреплением вала упомянутыми кулачками [4, 5], что исключает установку и снятие хомутика. Компенсирующий прижим кулачков к валу, выполняемый переменным движением кулачков, позволяет компенсировать влияние на погрешность установки не только отклонения диаметра поверхности, за которую вал зажимается, но и отклонения расположения упомянутой поверхности относительно центрального отверстия. Кроме того, окончательное закрепление одновременно всеми кулачками также уменьшает погрешность установки за счет равномерного давления кулачков на вал. Таким образом, решение поставленной задачи позволяет достичь технического результата – повышения производительности способа и точности установки вала.

На рисунке показана схема осуществления способа установки вала. На шпиндель 1 станка устанавливают механизированный патрон 2 с переменным движением кулачков 3 и 4. Устанавливают передний упорный центр 5 в патрон 2. Устанавливают задний упорный центр 6 в пиноль 7 задней бабки 8 станка. Вал 9 устанавливают центровыми отверстиями 10 и 11 соответственно на передний 5 и задний 6 упорные центры. От привода (на рисунке не показан) сообщают кулачкам 3 и 4 радиальные переменные перемещения на сближение с валом 9. При касании одним из кулачков с наружной поверхностью 12 его движение прерывают, а других продолжают. Движение остановившегося кулачка возобновляют после касания упомянутой поверхности всеми другими кулачками. Дальнейшими одновременными перемещениями всех кулачков окончательно зажимают вал 9. Такое переменное движение кулачков не нарушает выполненного базирования вала на центрах 5 и 6 за счет равномерного давления кулачков при зажиме вала.

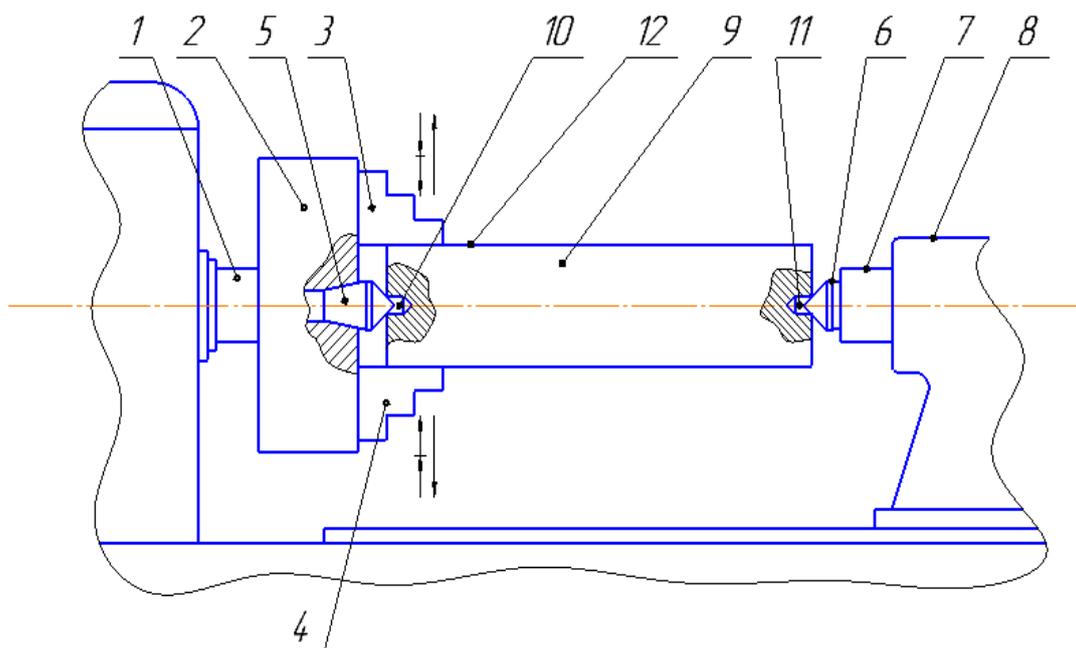


Схема осуществления способа установки вала на центрах токарного станка

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный структурный анализ способов, используемых при установке заготовок на токарный станок, а также известных из литературных источников и в патентной документации, позволил выявить их невысокую производительность, а в некоторых случаях – снижение точности установки. Разработанный способ позволяет устранить отмеченные недостатки. Способ может быть использован на машиностроительных предприятиях при автоматической загрузке, разгрузке и переустановке заготовок на технологическом оборудовании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 1 / под ред. Косиловой А.Г., Мещерякова Р.К. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение. 1986. 656 с.
2. Беспалов Б.Л. Технология машиностроения: учебное пособие для вузов / Беспалов Б.Л., Глейзер Л.А., Колесов И.М., Латышев Н.Г. [и др.]. М.: Машиностроение. 1973. 448 с.
3. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 1 / Дальский А.М., Суслов А.Г., Косилова А.Г. [и др.]. 5-е изд., испр. М.: Машиностроение – 1. 2003. 912 с.
4. Патент РФ 2623549. *Способ установки заготовки в двухкулачковом механизированном патроне* / Архаров А.П. Заявл. 26.10.2016. Оpubл. 27.06.2017, Бюл. № 18.
5. Патент РФ 2655417. *Патрон двухкулачковый клиновой механизированный* / Архаров А.П., Павлов А.В. Заявл. 18.07.2017. Оpubл. 28.05.2018, Бюл. № 16.

METHOD OF WORKPIECE INSTALLATION ON LATHE CENTERS

A.P. ARKHAROV, Cand. Sci., S.S. MITYUSHIN

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb.,
170026, Tver, Russian Federation, e-mail: mitiushin.serega@yandex.ru

The paper presents the method of installation the workpiece on the centers of the lathe, namely, the way of mounting a power-operated chuck with jaws' varying motion on the machine spindle. The front thrust center is mounted in the chuck, and the rear thrust center – in the tailstock of the machine. The center holes of a shaft workpiece are installed on the front and rear thrust centers. Next, the pressing of jaws to the fixed surface of the workpiece is carried out, followed by involving all the jaws so that they simultaneously fix the workpiece. The method makes it possible to improve the performance and the accuracy of installation. The method can be used for the automatic workhandling and transposition of shaft-type workpieces in the process environment at machine-building enterprises.

Keywords: workpiece, shaft, method, installation, automation, lathe, center.

REFERENCES

1. Spravochnik tehnologa-mashinostroitelja v 2-h t. [Directory technologist machine builder in 2 volumes] T. 1 // Eds. Kosilova A.G., Meshcheryakov R.K. 4-th edition – Moscow: Mashinostroenie. 1986. 656 p.
2. Bespalov B.L. Tehnologija mashinostroenija [Engineering technology]. Uchebnoe posobie dlja vuzov [Textbook for universities] // Bespalov B.L., Glazer L.A., Kolesov I.M., Latyshev N.G. etc. Moscow: Mashinostroenie. 1973. 448 p.
3. Spravochnik tehnologa – mashinostroitelja v 2-h t. [Directory technologist machine builder in 2 volumes] T. 1 // Dalsky A.M., Suslov A.G., Kosilova A.G., etc. Moscow: Mashinostroenie – 1. 2003. 912 p.
4. Patent RF 2623549. *Sposob ustanovki zagotovki v dvuhkulachkovom mehanizirovannom patrone* [The method of installation of the workpiece in two-jaw mechanized chuck] // Arkharov A.P. Declared 26.10.2016. Published 27.06.2017. Bulletin No. 18.
5. Patent RF 2655417. *Patron dvuhkulachkovyj klinovoj mehanizirovannyj* [The chuck two-jaw wedge mechanized] // Arkharov A.P., Pavlov A.V. Declared 18.07.2017. Published 28.05.2018. Bulletin No. 16.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОДНОСЛОЙНОЙ УГЛЕРОДНОЙ ТРУБКИ КАК ИГЛЫ СКАНИРУЮЩЕГО МИКРОСКОПА

С.М. СЛОБОДЯН, д-р техн. наук, Д.А. БАРЧУКОВ, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет, 170026, Тверь,
наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: sms_46@ngs.ru

© Слободян С.М., Барчуков Д.А., 2019

В статье описывается техническое решение по совершенствованию устройств, обеспечивающих получение информации о топологии и других свойствах поверхности объекта, предназначенное для использования в туннельной, атомно-силовой и других видах сканирующей зондовой микроскопии, при измерении в качестве зонда Кельвина, при определении контраста сопротивлений растекания, измерении термодинамики полей лазерного и лучевого воздействия и т.п. Техническим результатом предлагаемых изменений является повышение точности и надежности зонда сканирующего микроскопа.

Ключевые слова: атомно-силовой микроскоп, нанотрубка, положение иглы, поверхность измерения.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования указывают на то, что развитие нанотехнологии контроля [1–7] в области электроники, биологии и материаловедения требует повышения качества методов наблюдения, оценки параметров и контроля состояния игл зондов в динамике их применения. Недостаточная точность оценки координат положения игл при сканировании является причиной их жестких контактов с выступами неравномерности исследуемой поверхности [8–10]. Потому изучение особенностей взаимодействия «игла – поверхность» и создание устройств зонда, соответствующих модели более точного их динамического поведения, является важным и актуальным.

Известен зонд для сканирующей емкостной микроскопии, состоящий из консоли с укрепленной на одном ее конце иглой, закрепленной на чипе другой стороной, и имеющий проводящий слой, расположенный, по крайней мере, на поверхности зонда со стороны иглы. На поверхности зонда со стороны иглы установлен проводящий экран, отделенный от проводящего слоя первой диэлектрической прослойкой [8].

Недостатком данного устройства является функционально узкая область применения, ограниченная предназначением только для измерения емкости образцов, покрытых тонким слоем диэлектрика, что ограничивает его применение для решения других задач туннельной, атомно-силовой и других видов сканирующей зондовой микроскопии.

Известен зонд для сканирующего зондового микроскопа, содержащий кварцевый резонатор с иглой, закрепленной на одном его конце, причем другой конец установлен на держателе-платформе [9].

Недостатком устройства является его низкая надежность, связанная с кварцевым резонатором и нестабильностью его характеристик, возникающая из-за приклейки его одним концом к держателю-платформе. Это также затрудняет процедуру замены иглы без замены всего дорогостоящего зонда и сужает его функциональные возможности.

Известен зонд сканирующего зондового микроскопа, состоящий из последовательно соединенных рабочего элемента нанозонда в виде иглы, консоли, держателя, датчика частоты собственных колебаний консоли и оптического датчика движения консоли, оптически связанного с консолью [10].

Недостатками устройства является то, что во время сближения и подвода иглы к образцу возникает жесткий контакт иглы с поверхностью, вызывающий повышенный износ иглы и, часто, ее повреждение, требующее необходимость дорогостоящих замен. Кроме того, износ или повреждение иглы меняет случайным образом ее размер, внося априори неизвестную случайную погрешность измерения, обусловленную изменением формы иглы, что ухудшает точность и достоверность измерения зондом. Это снижает точность и надежность применения данного зонда.

Актуальной задачей является создание устройства, позволяющего в реальном времени компенсировать повышенный износ и повреждение игл, требующих их замены.

МЕТОДЫ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Классически [10] нанозонд сканирующего микроскопа состоит из последовательно соединенных рабочего элемента нанозонда, консоли, держателя, датчика частоты собственных колебаний консоли и оптического датчика движения консоли, оптически связанного с консолью. Решение задачи и технический результат усовершенствования достигаются тем, что в нанозонд дополнительно введены привод рабочего элемента и блок формирования сигнала рассогласования положения рабочего элемента, входы которого подключены к выходам оптического датчика движения консоли и датчика частоты собственных колебаний консоли, выход блока формирования сигнала связан с входом привода рабочего элемента, а второй вход связан с консолью, при этом рабочий элемент выполнен в виде углеродной нанотрубки, которая является однослойной.

Выполнение рабочего элемента в виде углеродной нанотрубки позволяет осуществлять его перемещение в реальном времени, стабилизацию его размера, вынесенного за пределы свободного конца консоли, таким образом компенсировать износ или повреждение рабочего элемента, сохраняя постоянным его размер, что повышает точность и достоверность измерения сканирующим микроскопом в сочетании с уникальными прочностными свойствами углеродной нанотрубки.

Применение принципа управления положением углеродной нанотрубки позволяет варьировать в широком диапазоне зазор контактного и неконтактного взаимодействия углеродной нанотрубки с поверхностью, изменяя в реальном времени условия сближения углеродной нанотрубки созданием необходимого зазора, положения трубки в пространстве области взаимодействия углеродной нанотрубки с поверхностью объекта. Управление положением однослойной углеродной нанотрубки осуществляет привод рабочего элемента, подключенный к блоку формирования сигнала рассогласования положения рабочего элемента, изменяющий до требуемого размера зазор «нанотрубка–поверхность». Регулировка зазора между углеродной нанотрубкой и поверхностью обеспечивает наилучшие условия реализации точности того или иного метода измерения, который принят в данном типе зондовой микроскопии. Возможность сдвига углеродной нанотрубки для сохранения зазора между трубкой и поверхностью в соизмеримом с длиной углеродной нанотрубки диапазоне регулирования позволяет решать проблемы жесткого контакта, контроля состояния рабочего элемента при наличии актов его разрушения или «затупления» при

контакте с поверхностью. Под «затуплением» понимается изменение формы конца иглы.

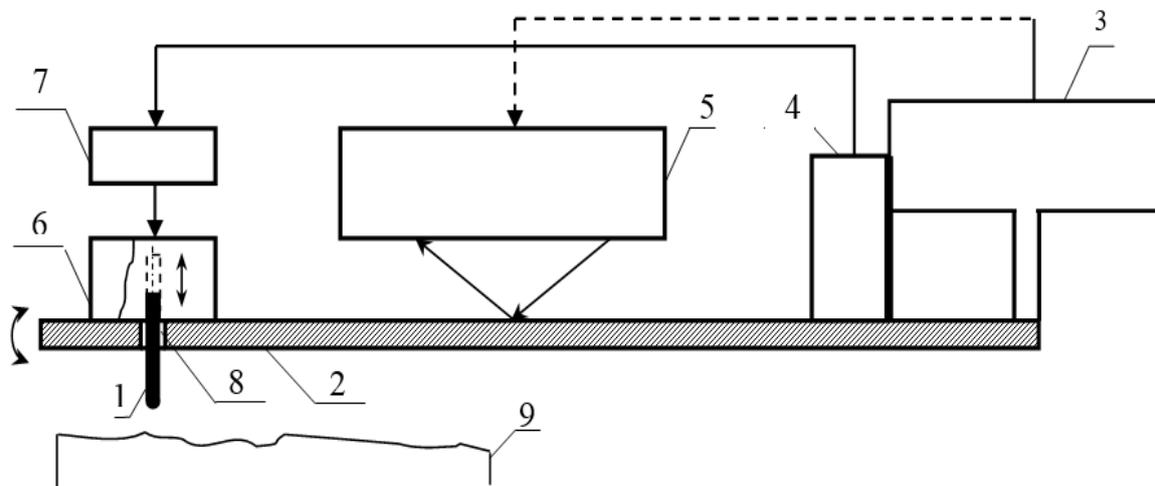
Блок формирования сигнала рассогласования положения рабочего элемента на основе сравнения выходных сигналов датчика частоты собственных колебаний консоли и оптического датчика движения консоли позволяет достичь создания требуемых условий повышения точности неразрушающего контроля формы и неравномерности поверхности объекта в течение времени, необходимого и достаточного для сохранения постоянства параметров зонда в интервале длительности проводимого исследования.

Предложенное устройство нанозонда можно использовать практически во всех вариантах, в том числе туннельной, атомно-силовой и других видах сканирующей зондовой микроскопии, а также в обособленных системах измерения пространственного распределения рельефа поверхностей объектов путем сканирования их зондом, в устройствах диагностики пространственного распределения форм и неразрушающего контроля неравномерности поверхностей, включая динамику их изменения с помощью известных методов, которые предназначены для использования в сканирующей микроскопии и т.п.

Таким образом, с повышением точности функционирования нанозонда с рабочим элементом, выполненным из углеродной нанотрубки, одновременно повышается надежность устройства.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Функциональная схема нанозонда сканирующего микроскопа представлена на рисунке.



Функциональная схема нанозонда сканирующего микроскопа

Нанозонд сканирующего микроскопа состоит из рабочего элемента 1, выполненного в виде однослойной углеродной нанотрубки, консоли 2, жестко закрепляемой в держателе 3, являющемся опорной частью нанозонда, датчика 4 частоты собственных колебаний консоли и оптического датчика 5 движения консоли. Датчик частоты собственных колебаний консоли, в частном случае, выполнен из пьезоэлектрического элемента, который одним концом закреплен на консоли, а вторым – прикреплен к держателю. Оптический датчик движения консоли, жестко закрепленный на держателе, связан оптически (лазерным лучом) со свободным концом

консоли. В окрестности конца консоли размещена углеродная нанотрубка и привод 6 рабочего элемента, в котором размещена углеродная нанотрубка. Блок 7 формирования сигнала рассогласования положения нанотрубки, связанный электрически с датчиком частоты собственных колебаний консоли и оптическим датчиком движения консоли, выполнен по схеме решающего логического устройства. Выработка сигнала о необходимости смещения (показано двухсторонней стрелкой) приводом нанотрубки формируется на основе сопоставления информации об изменении выходных сигналов датчика частоты собственных колебаний консоли и оптического датчика движения консоли. Привод нанотрубки установлен (показано в разрезе) соосно с отверстием проходного канала нанотрубки в окрестности свободного конца консоли. Отверстие 8 на свободном конце консоли является проходным – направляющей перемещения нанотрубки, ортогональной к консоли. Отверстие (показано пунктиром в б) на свободном конце консоли вкупе с приводом нанотрубки предотвращает ее смещение в плоскости консоли, одновременно позволяя перемещать (показано двухсторонней стрелкой в б) по длине и положению нанотрубку в ортогональной плоскости к поверхности консоли. При изгибе консоли (направления изгиба показаны криволинейной стрелкой) нанотрубка и привод смещаются с областью их крепления совокупно с перемещением свободного конца консоли.

Оптический датчик движения консоли, жестко закрепленный на держателе и связанный оптически со свободным концом консоли и нанотрубкой, непрерывно отслеживает положение нанотрубки относительно исследуемой поверхности. Определение отклонения от принятого размера зазора взаимодействия нанотрубки с поверхностью 9 основано на контроле отклонения луча полупроводникового лазера, отраженного от кончика торца нанотрубки. Данные координат положения нанотрубки оптический датчик движения консоли передает в блок формирования сигнала рассогласования положения нанотрубки, связанный электрически с приводом, совместно с сигналом датчика частоты собственных колебаний консоли, управляющей перемещением нанотрубки при необходимости.

Нанозонд сканирующего микроскопа работает следующим образом.

В начале работы вручную или электронной системой сканирующего микроскопа нанозонд «грубо» подводится к поверхности. Зонд начинает взаимодействовать с поверхностью при их сближении на расстояние менее сотен нанометров. Затем перемещение нанозонда вдоль поверхности осуществляется более точным устройством, обеспечивающим сканирование поверхности нанотрубкой. При точном сканировании углеродная нанотрубка движется над поверхностью. Информационный параметр сигнала, снимаемого с нанотрубки, определяется типом зондовой микроскопии. Например, в туннельной микроскопии по одной из методик туннельный ток поддерживается стабильным за счет обратной связи, показания же оптического датчика движения консоли меняются в зависимости от топографии поверхности. Эти изменения регистрируют; на их основе строят карту высот поверхности. Другая методика предполагает движение нанотрубки на фиксированной высоте над поверхностью. В этом случае регистрируют изменение тока. Его значения служат основой построения топографии поверхности. Можно утверждать, что принцип работы нанозонда сканирующего микроскопа основан на регистрации взаимодействия между поверхностью и нанотрубкой.

В описываемом зонде в качестве рабочего элемента используется однослойная углеродная нанотрубка, установленная на свободном, не закрепленном конце консоли, называемой часто кантилевером. Сила, действующая со стороны поверхности, приводит к изгибу консоли с соответствующим смещением нанотрубки. Появление выбросов или впадин поверхности под нанотрубкой приводит к изменению

силы, действующей на зонд, и изменению изгиба консоли. Таким образом, регистрируя значение изгиба консоли, можно сделать вывод о рельефе поверхности.

В зависимости от характера действия силы между свободным концом консоли и исследуемой поверхностью различают три режима взаимодействия нанотрубки микроскопа: контактный, полуконтактный и бесконтактный. Принцип действия зонда рассмотрим в наиболее «тяжелых» для углеродной нанотрубки режимах сканирования с актами прямого контакта углеродной нанотрубки с поверхностью. Эти режимы отличаются наличием динамического и ударного воздействий, ведущих к ускоренной до катастроф деструкции игл зонда.

В контактном режиме взаимодействия нанотрубки с поверхностью микроскоп является аналогом профилометра. Сканирование зондом осуществляется, как правило, в режиме постоянной силы, когда оптический датчик движения консоли и встроенный в систему обратной связи датчик частоты собственных колебаний консоли оценивают значение изгиба консоли и частоту вынужденных ее колебаний под действием неравномерного рельефа поверхности. В этом случае свободный конец консоли, с закрепленной на нем углеродной нанотрубкой, перемещается на некоторой средней высоте над поверхностью. Изгиб консоли, одним концом закрепленной в держателе, пропорционален силе, действующей со стороны поверхности на углеродную нанотрубку, установленную на свободном, безопорном втором конце консоли. Работа нанозонда в полуконтактном режиме практически повторяет алгоритм работы в контактном режиме. Полуконтактный режим отличается от контактного существенно меньшим числом соприкосновений, в том числе и ударных, нанотрубки с поверхностью.

В контактном режиме применения непосредственное механическое взаимодействие известных вариантов зонда с поверхностью часто приводит к поломке зондов и разрушению, особенно биологической, поверхности в процессе сканирования. Прочность, упругость и износоустойчивость углеродных нанотрубок способна существенно повысить точность измерения и надежность (равносильно продлению живучести) нанозонда.

При износе или обломе углеродной нанотрубки предлагаемое решение обеспечивает возможность наноразмерного смещения углеродной нанотрубки в зависимости от типа привода по длине и положению в ортогональной и тангенциальной плоскости к поверхности консоли. При изгибе консоли нанотрубка и привод смещаются совокупно с областью их крепления, а именно с перемещением свободного конца консоли.

При работе в бесконтактном режиме пьезоэлемент датчика частоты собственных колебаний консоли принудительно возбуждает колебания углеродной нанотрубки зонда на некоторой частоте (лучше резонансной). Амплитуда и фаза собственных и вынужденных колебаний углеродной нанотрубки зонда выделяется датчиком частоты собственных колебаний консоли и оптическим датчиком движения консоли, выходные сигналы которых поступают на блок формирования сигнала рассогласования положения углеродной нанотрубки, связанного электрически с приводом. При равенстве этих сигналов в блоке формирования сигнала рассогласования положения нанотрубки они компенсируют друг друга. При неравенстве и наличии прироста сигнала оптического датчика движения консоли, вызванного воздействием рельефа поверхности, блок выделяет рассогласование как полезный сигнал. Амплитуда и фаза этого сигнала находятся в прямой зависимости от силы, действующей со стороны исследуемой поверхности. Таким образом, выделяемый в блоке формирования сигнала

рассогласования положения углеродной нанотрубки сигнал рассогласования служит основой принятия решения в реальном времени.

Таким образом, предлагаемое устройство нанозонда может быть использовано в системах сканирующей микроскопии для управляемого сканирования и коррекции износа рабочего элемента зонда в широком диапазоне (более порядка) изменения длин, скоростей и мер износа путем управления положением углеродной нанотрубки и параметрами режимов сканирования нанотрубкой в реальном времени.

Регулировкой зазора между торцом углеродной нанотрубки и поверхностью создаются наилучшие условия реализации того или иного метода измерения, который принят в данном типе сканирующей зондовой микроскопии. Наличие подвижного положения углеродной нанотрубки регулируемой длины рабочего элемента зонда для управляемого воздействия на величину зазора между нанотрубкой и поверхностью с равным длине углеродной нанотрубки размером регулирования позволяет предотвращать основные проблемы, связанные с жесткими контактами, отсутствием контроля состояния кончика зонда и возникновением актов разрушения или затупления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В отличие от известных устройств зонда [8–10], в которых общее время сканирования ограничено десятью минутами, для предлагаемого зонда время сканирования определяется износом полной длины углеродной трубки, превышающей на два порядка и более длину известных игл зонда.

Технический результат, целью которого является повышение точности и надежности зонда, достигнут путем введения однослойной углеродной нанотрубки в качестве рабочего элемента с контролем ее положения и управления перемещением в реальном времени взаимодействия.

Практическое использование предлагаемого нанозонда возможно во всех типах сканирующей зондовой микроскопии; его применение, обеспечивая стабильность параметров микроскопов, повышает точность и достоверность получаемых результатов.

На основе изложенного материала авторами была сформулирована заявка на изобретение. По результатам рассмотрения данной заявки Роспатентом принято решение о выдаче патента [11].

ЛИТЕРАТУРА

1. Kim S.H., Haines C.S., Li N., Kim K.J., Mun T.J., Choi C., Di J., Oh Y.J. Harvesting electrical energy from carbon nanotube yarn twist. *Science*. 2017. V. 357. P. 6353–6355.

2. Zhang B., Liu Y., Chen Q., Lai Z., Sheng P. Observation of high T_c one dimensional superconductivity in 4 angstrom carbon nanotube arrays. *AIP Advances*. 2017. V. 7. P. 025305.

3. Liu L., Xu J., Zhang R., Wu S., Hu X., Hu X. Three-Dimensional Atomic Force Microscopy for sidewall imaging using torsional resonance mode // *Scanning*. 2018. V. 2018. P. 7606037–7606044.

4. Bartošík M., Kormoš L., Flajšman L., Kalousek R., Mach J., Lišková Z., Nezval D., Švarc V., Šamořil T., Šikola T. Nanometer-sized water bridge and pull-off force in AFM at different relative humidities: Reproducibility measurement and model based on surface tension change // *J. Physics Chemistry B*. 2017. V. 121. P. 610–619.

5. Özer H.Ö. Atomic resolution force imaging through the static deflection of the cantilever in simultaneous Scanning Tunneling/Atomic Force Microscopy // *Ultramicroscopy*. 2019. V. 196. P. 54–57.
6. Vikrant K.S., Jayanth G.R. An AFM tip replacement system compatible with all ambient media and operation modalities // *Ultramicroscopy*. 2019. V. 196. P. 136–141.
7. Caplins B.W., Holm J.D., Keller R.R. Transmission imaging with a programmable detector in a scanning electron microscope // *Ultramicroscopy*. 2019. V. 196. P. 40–48.
8. Патент РФ 2289862. Зонд для сканирующей емкостной микроскопии / Быков В.А., Быков А.В., Мягков И.В., Трегубов Г.А., Поляков В.В. Заявл. 23.12.2004. Оpubл. 20.12.2006, Бюл. № 35.
9. Giessibl F.J. High-speed force sensor for force microscopy and profilometry utilizing a quartz tuning fork // *Applied Physics Letters*. 1998. V. 73. № 26. P. 3956–3958. *Appl. Phys. Lett.* 1999, V. 74, p. 4070.
10. Atomic Force Microscopy in Molecular and Cell Biology. Editors: Cai J. (Ed.). Singapore: Springer Singapore. 2018. 235 p.
11. Патент РФ 2687180. Нанозонд сканирующего микроскопа / Барчуков Д.А., Слободян С.М. Заявл. 01.08.2018. Оpubл. 07.05.2019, Бюл. № 13.

THE FEATURES OF USAGE OF THE SINGLE-WALLED CARBON TUBE AS A SCANNING MICROSCOPE'S NEEDLE

S.M. SLOBODYAN, Dr. Sci., D.A. BARCHUKOV, Cand. Sci.

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: sms_46@ngs.ru

The article describes a technical solution for improvement of devices provides information about topology and other properties of the object surface, that intends for use in tunneling, atomic force and other types of scanning probe microscopy, when measured as a Kelvin probe, in determining the contrast of spreading resistance, in measuring the thermodynamics of the fields of laser and radiation impact, etc.

The technical result of proposed changes is improving an accuracy and reliability of the scanning microscope's probe.

Keywords: atomic force microscope, nanotube, needle position, measurement surface.

REFERENCES

1. Kim S.H., Haines C.S., Li N., Kim K.J., Mun T.J., Choi C., Di J., Oh Y.J. Harvesting electrical energy from carbon nanotube yarn twist. *Science*. 2017. V. 357, pp. 6353–6355.
2. Zhang B., Liu Y., Chen Q., Lai Z., Sheng P. Observation of high T_c one dimensional superconductivity in 4 angstrom carbon nanotube arrays. *AIP Advances*. 2017. V. 7, pp. 025305.
3. Liu L., Xu J., Zhang R., Wu S., Hu X., Hu X. Three-Dimensional Atomic Force Microscopy for sidewall imaging using torsional resonance mode. *Scanning*. 2018. V. 2018. P. 7606037–7606044.

*ISSN 2658-5030. Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 4 (4), 2019*

4. Bartošík M., Kormoš L., Flajšman L., Kalousek R., Mach J., Lišková Z., Nezval D., Švarc V., Šamořil T., Šikola T. Nanometer-sized water bridge and pull-off force in AFM at different relative humidities: Reproducibility measurement and model based on surface tension change. *J. Physics Chemistry B*. 2017. V. 121, pp. 610–619.
5. Özer H.Ö. Atomic resolution force imaging through the static deflection of the cantilever in simultaneous Scanning Tunneling/Atomic Force Microscopy. *Ultramicroscopy*. 2019. V. 196. pp. 54–57.
6. Vikrant K.S., Jayanth G.R. An AFM tip replacement system compatible with all ambient media and operation modalities. *Ultramicroscopy*. 2019. V. 196, pp. 136–141.
7. Caplins B.W., Holm J.D., Keller R.R. Transmission imaging with a programmable detector in a scanning electron microscope. *Ultramicroscopy* 2019. V. 196, pp. 40–48.
8. Patent RF 2289862. *Zond dlya skaniruyushchey yemkostnoy mikroskopii* [Probe for scanning capacitive microscopy] / Bykov V.A., Bykov A.V., Myagkov I.V., Tregubov G.A., Polyakov V.V. Declared 23.12.2004. Published 20.12.2006. Bull. 35.
9. Giessibl F.J. High-speed force sensor for force microscopy and profilometry utilizing a quartz tuning fork *Applied Physics Letters*. 1998. V. 73. No. 26, pp. 3956–3958. *Applied Physics Letters* 1999, V. 74, p. 4070.
10. Atomic Force Microscopy in Molecular and Cell Biology. Editors: Cai J. (Ed.). Singapore: Springer Singapore. 2018. 235 p.
11. Patent RF 2687180. *Nanozond skaniruyushchego mikroskopa* [Nanoprobe of a scanning microscope] / Barchukov D.A., Slobodyan S.M. Declared 01.08.2018. Published 07.05.2019, Bulletin No. 13.

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЙ МЕХАНИЧЕСКИЕ РЕЗОНАНСЫ

И.П. ПОПОВ, ст. препод.

Курганский государственный университет, 640020, г. Курган,
ул. Советская, 63, стр. 4, e-mail: ip.porow@yandex.ru

© Попов И.П., 2019

Даны определения механических резонансов сил и скоростей. Определение 1. Резонанс сил – это механический резонанс, возникающий на частоте $\omega = \sqrt{k/m}$ в механической системе, включающей инертное тело и упругий элемент, при котором развиваемые ими реактивные силы максимальны и противоположны. Определение 2. Резонанс скоростей – это механический резонанс, возникающий на частоте $\omega = \sqrt{k/m}$ в механической системе, включающей инертное тело и упругий элемент, при котором развиваемые ими скорости максимальны и противоположны. Доказаны две теоремы. Теорема 1. При выполнении условия $\omega = \sqrt{k/m}$ в механической системе, состоящей из параллельно соединенных инертного тела, упругого элемента и демпфера, возникает резонанс сил. Теорема 2. При выполнении условия $\omega = \sqrt{k/m}$ в механической системе, состоящей из последовательно соединенных инертного тела, упругого элемента и демпфера, возникает резонанс скоростей. Классический механический резонанс является резонансом сил.

Ключевые слова: резонанс сил, скоростей, параллельное соединение, последовательное соединение, источник силы, скорости.

ВВЕДЕНИЕ

Учет механических резонансных явлений в технических системах является актуальной задачей [1, 2]. При этом резонанс может быть как вредным, так и полезным. Исходя из этого, разработчики машин и механизмов стремятся, соответственно, либо не допустить его развитие, либо наоборот – создать для него необходимые условия. Крайним негативным последствием вредного проявления резонанса является разрушение механических конструкций и вывод машин из строя. Полезное действие резонанса заключается в существенном увеличении амплитуды перемещений рабочих органов механизмов и возрастании их силового воздействия.

В основе описания резонанса лежит широко известное дифференциальное уравнение [3, 4]

$$a_2 \frac{d^2 x}{dt^2} + a_1 \frac{dx}{dt} + a_0 x = a_\omega \sin \omega t, \quad (1)$$

имеет решение $x = x_1 + x_2$, где

$$x_1 = ae^{-bt} \sin(\omega_1 t + \alpha) - \quad (2)$$

собственные затухающие колебания,

$$x_2 = A \sin(\omega t - \varphi) - \quad (3)$$

вынужденные колебания, a , α – постоянные интегрирования,

$$b = \frac{a_1}{2a_2}, \quad \omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - b^2}, \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{a_0}{a_2}}, \quad A = \frac{\delta_0}{\sqrt{(1-\lambda^2)^2 + 4h^2\lambda^2}}, \quad (4)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2h\lambda}{1-\lambda^2}, \quad \lambda = \frac{\omega}{\omega_0}, \quad h = \frac{b}{\omega_0}, \quad \delta_0 = \frac{a_\omega}{a_0}. \quad (5)$$

При подстановках

$$a_2 = m, \quad a_1 = r, \quad a_0 = k, \quad a_\omega = F \quad (6)$$

уравнение (1) превращается в классическое дифференциальное уравнение вынужденных механических колебаний [5–7]:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + r \frac{dx}{dt} + kx = F \sin \omega t, \quad \text{или} \quad m \frac{dv}{dt} + rv + k \int v dt = F \sin \omega t. \quad (7)$$

При

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (8)$$

имеет место резонанс.

Теоретическая электротехника, объекты и процессы которой математически изоморфны механическим, различает два резонанса – резонанс напряжений и резонанс токов.

В 1873 г. Максвелл ввел первую (из двух) систему электромеханических аналогий, в соответствии с которой напряжение дуально силе, а ток – скорости. В этой связи возникает закономерный вопрос: резонанс применительно к уравнению (7) это резонанс сил или скоростей? Ответ на этот и связанные с ним вопросы составляет предмет настоящего исследования.

Определение 1. Резонанс сил – это резонанс, возникающий на частоте (8) в механической системе, включающей инертное тело и упругий элемент, при котором развиваемые ими реактивные силы максимальны и противоположны.

Определение 2. Резонанс скоростей – это резонанс, возникающий на частоте (8) в механической системе, включающей инертное тело и упругий элемент, при котором развиваемые ими скорости максимальны и противоположны.

РЕЗОНАНС СИЛ

Уравнению (7) соответствует схема параллельного соединения (рис. 1), при котором инертное тело и изменения размеров упругого элемента и демпфера имеют единую скорость, а их реактивные силы складываются. При этом сумма реактивных сил потребителей механической мощности равна силе, развиваемой источником механической мощности [8], который подобно источнику напряжения в электротехнике можно назвать источником силы.

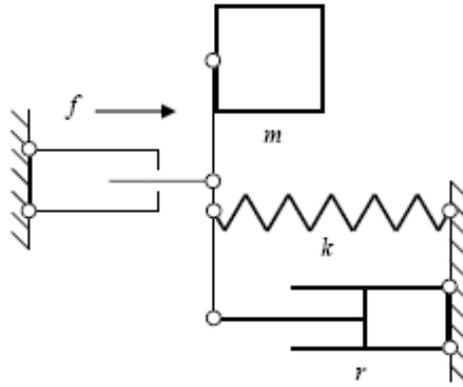


Рис. 1. Схема параллельного соединения

Справедлива теорема 1. При выполнении условия (8) в механической системе, состоящей из параллельно соединенных инертного тела, упругого элемента и демпфера, что соответствует уравнению (7), возникает резонанс сил.

Доказательство. В соответствии с (4)–(6)

$$A = \frac{F}{k} \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{m\omega^2}{k}\right)^2 + 4 \frac{r^2 m}{4m^2 k} \frac{m\omega^2}{k}}} = \frac{F}{k} \frac{1}{\omega/k \sqrt{(k/\omega - m\omega)^2 + r^2}} = \frac{F}{\omega \sqrt{(k/\omega - m\omega)^2 + r^2}}.$$

В установившемся режиме

$$x = A \sin(\omega t - \varphi) = \frac{F}{\omega \sqrt{(k/\omega - m\omega)^2 + r^2}} \sin(\omega t - \varphi);$$

$$f_k = kx = \frac{kF}{\omega \sqrt{(k/\omega - m\omega)^2 + r^2}} \sin(\omega t - \varphi); \quad (9)$$

$$f_m = m \frac{d^2 x}{dt^2} = -\frac{m\omega^2 F}{\omega \sqrt{(k/\omega - m\omega)^2 + r^2}} \sin(\omega t - \varphi). \quad (10)$$

При выполнении условия (8)

$$f_k^* = \frac{kF}{\sqrt{k/m} \sqrt{(k/\sqrt{k/m} - m\sqrt{k/m})^2 + r^2}} \sin(\omega t - \varphi) = \frac{\sqrt{mk} F}{r} \sin(\omega t - \varphi); \quad (11)$$

$$f_k^* = \frac{\sqrt{k/m} \sqrt{mk} F}{\omega r} \sin(\omega t - \varphi) = \frac{kF}{\omega r} \sin(\omega t - \varphi); \quad (12)$$

$$f_m^* = -\frac{m\sqrt{k/m} F}{\sqrt{(k/\sqrt{k/m} - m\sqrt{k/m})^2 + r^2}} \sin(\omega t - \varphi) = -\frac{\sqrt{mk} F}{r} \sin(\omega t - \varphi); \quad (13)$$

$$f_m^* = -\frac{\omega \sqrt{mk} F}{\sqrt{k/mr}} \sin(\omega t - \varphi) = -\frac{\omega m F}{r} \sin(\omega t - \varphi). \quad (14)$$

Выражения (11) и (13) показывают, что f_k^* и f_m^* равны и противоположны. Выражения (9) и (12), (10) и (14) показывают, что f_k^* и f_m^* максимальны.

Теорема доказана.

Следствие 1.1. В первую (максвелловскую) систему электромеханических аналогий добавляется следующее дуально-инверсное соответствие – последовательное соединение потребителей электрической мощности при резонансе напряжений дуально параллельному соединению потребителей механической мощности при резонансе сил.

Следствие 1.2. При резонансе сил реактивная сила системы «упругий элемент – инертное тело» равна нулю, поскольку $f_k^* = -f_m^*$.

Величину \sqrt{mk} по аналогии с электротехникой можно назвать *волновым сопротивлением* (системы).

Следствие 1.3. Если $\sqrt{mk} > r$, то реактивные силы, развиваемые инертным телом и упругим элементом, превышают приложенную силу.

Пример 1. $F = 100$ Н, $\omega = 2$ рад/с, $m = 10$ кг, $k = 40$ кг · с⁻², $r = 5$ кг · с⁻¹. Найти f_k^* и f_m^* .

В соответствии с (12) и (14)

$$f_k^* = \frac{40 \cdot 100}{2 \cdot 5} \sin(\omega t - \varphi) = 400 \sin(\omega t - \varphi) \text{ (Н)},$$

$$f_m^* = -\frac{2 \cdot 10 \cdot 100}{5} \sin(\omega t - \varphi) = -400 \sin(\omega t - \varphi) \text{ (Н)}.$$

Реактивные силы, развиваемые инертным телом и упругим элементом, превышают приложенную силу.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ

Инертное тело, упругий элемент и демпфер можно соединять не только параллельно, но и последовательно (рис. 2).

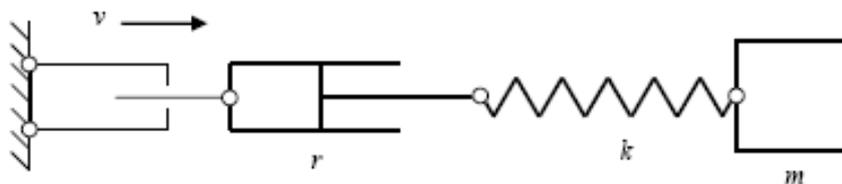


Рис. 2. Схема последовательного соединения

При последовательном соединении к элементам системы приложена единая сила, а скорости инертного тела и изменения размеров упругого элемента и демпфера складываются. При этом сумма скоростей потребителей механической мощности равна скорости, развиваемой источником механической мощности, который подобно источнику тока в электротехнике можно назвать источником скорости.

Скорости компонентов системы равны:

$$v_m = \frac{1}{m} \int f dt, \quad v_k = -\frac{1}{k} k \frac{dx}{dt} = -\frac{1}{k} \frac{df}{dt}, \quad v_r = \frac{f}{r}, \quad v = -V \cos \omega t;$$

$$v_m + v_k + v_r = v;$$

$$\frac{1}{k} \frac{df}{dt} + \frac{f}{r} + \frac{1}{m} \int f dt = -V \cos \omega t, \text{ или } \frac{1}{k} \frac{d^2 f}{dt^2} + \frac{1}{r} \frac{df}{dt} + \frac{1}{m} f = V \omega \sin \omega t. \quad (15)$$

Последнее уравнение изоморфно (1). Собственные затухающие колебания силы на штоке источника скорости для последовательного соединения в соответствии с (2) определяются выражением

$$f_1 = ae^{-bt} \sin(\omega_1 t + \alpha) = ae^{-\frac{k}{2r}t} \sin \left(\sqrt{\frac{k}{m} - \frac{k^2}{4r^2}} t + \alpha \right).$$

Вынужденные колебания силы на штоке источника скорости для последовательного соединения в соответствии с (3) определяются выражениями:

$$A = \frac{\delta_0}{\sqrt{(1-\lambda^2)^2 + 4h^2\lambda^2}} = \frac{V\omega m}{\sqrt{\left(1 - \omega^2 \frac{m}{k}\right)^2 + 4 \frac{k^2}{4r^2} \frac{m}{k} \omega^2 \frac{m}{k}}} = \frac{V\omega m}{\omega m \sqrt{\left(\frac{1}{\omega m} - \frac{\omega}{k}\right)^2 + \frac{1}{r^2}}};$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2h\lambda}{1-\lambda^2} = 2 \frac{k}{2r} \frac{\omega m}{k} \frac{1}{1 - \omega^2 m/k} = \frac{\omega m}{r\omega m(1/\omega m - \omega/k)};$$

$$f_2 = A \sin(\omega t - \varphi) = \frac{V}{\sqrt{[1/(\omega m) - \omega/k]^2 + 1/r^2}} \sin \left[\omega t - \operatorname{arctg} \frac{1}{r(1/\omega m - \omega/k)} \right].$$

РЕЗОНАНС СКОРОСТЕЙ

Справедлива теорема 2. При выполнении условия (8) в механической системе, состоящей из последовательно соединенных инертного тела, упругого элемента и демпфера, что соответствует уравнению (15), возникает резонанс скоростей.

Доказательство. В установившемся режиме

$$f = \frac{V}{\sqrt{[1/(\omega m) - \omega/k]^2 + 1/r^2}} \sin(\omega t - \varphi);$$

$$v_m = \frac{1}{m} \int f dt = -\frac{1}{\omega m} \frac{V}{\sqrt{[1/(\omega m) - \omega/k]^2 + 1/r^2}} \cos(\omega t - \varphi); \quad (16)$$

$$v_k = \frac{1}{k} \frac{df}{dt} = \frac{\omega}{k} \frac{V}{\sqrt{[1/(\omega m) - \omega/k]^2 + 1/r^2}} \cos(\omega t - \varphi). \quad (17)$$

При выполнении условия (8)

$$v_m^* = -\frac{1}{\sqrt{k/mm}} \frac{V}{\sqrt{[1/(\sqrt{k/mm}) - \sqrt{k/m}/k]^2 + 1/r^2}} \cos(\omega t - \varphi) = -\frac{Vr}{\sqrt{mk}} \cos(\omega t - \varphi); \quad (18)$$

$$v_m^* = -\frac{\sqrt{k/m} Vr}{\omega \sqrt{mk}} \cos(\omega t - \varphi) = -\frac{Vr}{\omega m} \cos(\omega t - \varphi); \quad (19)$$

$$v_k^* = \frac{\sqrt{k/m}}{k} \frac{V}{\sqrt{\left[1/(\sqrt{k/mm}) - \sqrt{k/m/k}\right]^2 + 1/r^2}} \cos(\omega t - \varphi) = \frac{Vr}{\sqrt{mk}} \cos(\omega t - \varphi); \quad (20)$$

$$v_k^* = \frac{\omega Vr}{\sqrt{k/m} \sqrt{mk}} \cos(\omega t - \varphi) = \frac{\omega Vr}{k} \cos(\omega t - \varphi). \quad (21)$$

Выражения (18) и (20) показывают, что v_k^* и v_m^* равны и противоположны. (16) и (19), (17) и (21) показывают, что v_k^* и v_m^* максимальны.

Теорема доказана.

Следствие 2.1. В первую (максвелловскую) систему электромеханических аналогий добавляется следующее дуально-инверсное соответствие – параллельное соединение потребителей электрической мощности при резонансе токов дуально последовательному соединению потребителей механической мощности при резонансе скоростей.

Следствие 2.2. При резонансе скоростей точка приложения силы к системе «упругий элемент – инертное тело» неподвижна, поскольку $v_k^* = -v_m^*$.

Следствие 2.3. Если $\sqrt{mk} < r$, то скорости, развиваемые инертным телом и упругим элементом, превышают скорость штока источника воздействия.

Пример 2. $V = 10 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, $r = 80 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}$, остальные данные из примера 1. Найти v_k^* и v_m^* .

В соответствии с (19) и (21):

$$v_m^* = -\frac{10 \cdot 80}{2 \cdot 10} \cos(\omega t - \varphi) = -40 \cos(\omega t - \varphi) \text{ (м} \cdot \text{с}^{-1}\text{)};$$

$$v_k^* = \frac{2 \cdot 10 \cdot 80}{40} \cos(\omega t - \varphi) = 40 \cos(\omega t - \varphi) \text{ (м} \cdot \text{с}^{-1}\text{)}.$$

Скорости, развиваемые инертным телом и упругим элементом, превышают скорость штока источника воздействия.

АРТЕФАКТЫ

Существуют устройства, в удовлетворительном приближении способные выполнять функции источников силы и источников скорости. Источником гармонической скорости может выступать привод с кривошипно-кулисным механизмом и маховиком с большим моментом инерции. Источником гармонической силы может выступать шток пневмоцилиндра, полость которого сообщается с полостью другого пневмоцилиндра, диаметр которого неизмеримо выше, чем у первого, а поршень совершает гармонические колебания.

В [9] описана механическая система из двух инертных тел и двух упругих элементов, для которой обнаружено «удивительное явление», при котором точка приложения гармонической силы остается неподвижной. Это явление очевидным, казалось бы, образом названо антирезонансом. Степень неудачности этого термина можно оценить, применив его к резонансу токов в электротехнике.

В действительности упомянутая система представляет собой суперпозицию «элементарных» систем, рассмотренных выше [10]. По этой причине процессы, происходящие в ней, являются суперпозицией соответствующих процессов, одним из которых и был резонанс скоростей, ошибочно принятый за «антирезонанс». При этом неподвижность точки приложения гармонической силы («удивительное явление») соответствует следствию 2.2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описываемый в курсах теоретической механики механический резонанс является резонансом сил. Ему соответствует параллельное соединение инертного тела, упругого элемента и демпфера. При последовательном соединении этих элементов возникает резонанс скоростей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Калякин Л.А. Уравнение Пенлеве-II как модель резонансного взаимодействия осцилляторов // *Труды Института математики и механики УрО РАН*. 2017. Т. 23. № 2. С. 104–116.
2. Еремин А.В., Жуков В.В., Кудинов В.А., Кудинов И.В. Резонансные и бифуркационные колебания стержня с учетом сил сопротивления и релаксационных свойств среды // *Изв. РАН. Механика твердого тела*. 2018. № 5. С. 92–104.
3. Сазонов В.В., Троицкая А.В. Периодические решения дифференциального уравнения второго порядка с большим параметром // *Прикладная математика и механика*. 2018. Т. 82. Вып. 5. С. 622–630.
4. Каспирович И.Е., Мухарлямов Р.Г. О методах построения уравнений динамики с учетом стабилизации связей // *Изв. РАН. Механика твердого тела*. 2019. № 3. С. 124–135.
5. Васильев В.В., Лурье С.А. Нелокальные решения сингулярных задач математической физики и механики // *Прикладная математика и механика*. 2018. Т. 82. Вып. 4. С. 459–471.
6. Алифов А.А. Автоколебания при запаздывании и ограниченной мощности источника энергии // *Изв. РАН. Механика твердого тела*. 2019. № 3. С. 147–154.
7. Голицына М.В. Периодический режим движения вибрационного робота при ограничении по управлению // *Прикладная математика и механика*. 2018. Т. 82. Вып. 1. С. 3–15.
8. Попов И.П. Меры механического движения с различными степенями скорости // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2018. № 1 (33). С. 49–53.
9. Пановко Я.Г., Губанова И.И. Устойчивость и колебания упругих систем: современные концепции, парадоксы и ошибки. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. 352 с.
10. Попов И.П. Суперпозиция состояний систем // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2018. № 2 (34). С. 39–43.

PARALLEL AND SERIAL MECHANICAL RESONANCES

I.P. POPOV, Senior Lecturer

Kurgan State University, Kurgan, 640020,
st. Sovetskaya, 63, p. 4, e-mail: ip.popow@yandex.ru

The definitions of mechanical resonances of forces and speeds are given. Definition 1. Resonance of forces is a mechanical resonance that occurs at a frequency $\omega = \sqrt{k/m}$ in a mechanical system, including an inert body and an elastic element, at which the reactive forces developed by them are maximal and opposite. Definition 2. Speed resonance is a mechanical resonance that occurs at a frequency $\omega = \sqrt{k/m}$ in a mechanical system, including an inert body and an elastic element, at which the speeds developed by them are maximum and opposite. Two theorems are proved. Theorem 1. When the condition $\omega = \sqrt{k/m}$ is fulfilled in a mechanical system consisting of a parallel-connected inert body, an elastic element and a damper, a resonance of forces occurs. Theorem 2. When the condition $\omega = \sqrt{k/m}$ is fulfilled in a mechanical system consisting of a series-connected inert body, an elastic element and a damper, a velocity resonance occurs. Classic mechanical resonance is a resonance of forces.

Keywords: resonance of forces, velocities, parallel connection, series, source of force, speed.

REFERENCES

1. Kalyakin L.A. Painlevé II equation as a model of resonant interaction of oscillators. *Trudy Instituta matematiki i mekhaniki UrO RAN*. 2017. V. 23, No 2, pp. 104–116. (In Russian).
2. Eremin A.V., Zhukov V.V., Kudinov V.A., Kudinov I.V. Resonant and bifurcation oscillations of a rod with allowance for resistance forces and relaxation properties of the medium. *Izv. RAN. Mekhanika tverdogo tela*. 2018. No 5, pp. 92–104. (In Russian).
3. Sazonov V.V., Troitskaya A.V. Periodic solutions of a second-order differential equation with a large parameter. *Prikladnaya matematika i mekhanika*. 2018. V. 82, No 5, pp. 622–630. (In Russian).
4. Kaspirovich I.E., Muharlyamov R.G. On methods for constructing equations of dynamics with regard to the stabilization of bonds. *Izv. RAN. Mekhanika tverdogo tela*. 2019. No 3, pp. 124–135. (In Russian).
5. Vasiliev V.V., Lurie S.A. Nonlocal solutions of singular problems of mathematical physics and mechanics. *Prikladnaya matematika i mekhanika*. 2018. V. 82, No 4, pp. 459–471. (In Russian).
6. Alifov A.A. Auto-oscillations in the delay and limited power of the energy source. *Izv. RAN. Mekhanika tverdogo tela*. 2019. No 3, pp. 147–154. (In Russian).
7. Golitsyna M.V. Periodic motion mode of a vibration robot with a control constraint. *Prikladnaya matematika i mekhanika*. 2018. V. 82, No. 1, pp. 3–15. (In Russian).
8. Popov I.P. Measures of mechanical motion with varying degrees of speed. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2018. No 1 (33), pp. 49–53. (In Russian).
9. Panovko YA.G., Gubanova I.I. Ustoychivost' i kolebaniya uprugikh sistem: Sovremennyye kontseptsii, paradoksy i oshibki [Stability and oscillations of elastic systems: Modern concepts, paradoxes and errors]. Moscow: Nauka. 1987. 352 p.
10. Popov I.P. Superposition of system states. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2018. No. 2 (34), pp. 39–43. (In Russian).

ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 622.331+622.641

АНАЛИЗ И ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ И РАБОТЫ ЭЛЕМЕНТОВ ПУСКОРЕГУЛИРУЮЩЕЙ АППАРАТУРЫ ГИДРОПРИВОДА ЛЕНТОЧНОГО ФИЛЬТР-ПРЕССА

И.И. МИХЕЕВ, канд. техн. наук, В.И. ГОРЯЧЕВ, д-р техн. наук, Д.М. ЩЕРБАКОВА

Тверской государственный технический университет, 170026, Тверь,
наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: dscherbakowa@yandex.ru

© Михеев И.И., Горячев В.И., Щербакова Д.М., 2019

В статье рассмотрена и обоснована конструкция гидропривода ленточного фильтр-пресса непрерывного действия. Гидропривод состоит из гидроцилиндров, передающих давление на поступающую торфяную массу, и пускорегулирующей аппаратуры, обеспечивающей поддержание в каждом гидроцилиндре оптимального давления в зависимости от физико-механических характеристик отжимаемого материала. Рассмотрена конструкция и работа элементов гидроаппаратуры, состоящей из набора для каждого гидроцилиндра регулируемых редукционного и переливного клапанов. Применение предложенного гидропривода с оптимизацией давления в гидроцилиндрах позволяет повысить качество отжима материалов с различной влажностью и фракционным составом.

Ключевые слова: фильтр-пресс, гидропривод, насос, гидроцилиндры, пусковая и регулирующая аппаратура, редукционные клапаны, переливные клапаны, манометры.

ВВЕДЕНИЕ

При добыче и переработке торфа обезвоживание торфа-сырца осуществляется в том числе ленточными фильтр-прессами непрерывного действия [1, 2], в которых давление на отжимаемый материал осуществляется гидроцилиндрами, штоки которых передают давление на фильтровальные полотна через нажимные ролики. При этом величина давления в каждом последующем гидроцилиндре возрастает по мере движения торфа между фильтровальными полотнами и должна быть оптимальной, соответствуя физико-механическим характеристикам отжимаемого материала. Для выполнения этого условия разработана конструкция гидропривода с гидравлической настройкой и последующей плавной регулировкой оптимального давления на каждом гидроцилиндре с автоматическим его поддержанием в процессе работы [3, 4]. Цель настоящей работы – проанализировать и обосновать конструкции и работу элементов пускорегулирующей аппаратуры предложенного гидропривода.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На рис. 1 представлен общий вид ленточного фильтр-пресса непрерывного действия. Фильтр-пресс состоит из рамы 1 с загрузочным бункером 2. На раме установлены приводные валы верхний 3 и нижний 4 (привод условно не показан), а также натяжные валы 5 и 6 с фильтровальными полотнами верхним 7 и нижним 8. Под холостой ветвью полотна 7 и на нижнем фильтровальном полотне 8 установлены

опорные ролики 13. На приводных валах 3 и 4 установлены счищающие ножи 14. Для сбора отфильтрованной воды с фильтровальных полотен установлены поддоны 15 и 16. Внутреннее прессовое пространство фильтр-пресса заполнено отжимаемым материалом 17.

Фильтр-пресс снабжен разработанным гидроприводом, защищенным патентом РФ на полезную модель [3]. Гидропривод включает в себя насос 18; трубопроводы напорный 19 и сливной 20; гидроцилиндры 9, параллельно подключенные к напорному трубопроводу 19. В гидроцилиндрах расположены штоки 10, установленные в направляющих 11. При этом на концах штоков закреплены нажимные ролики 12.

Поскольку гидроцилиндры питаются от одного насоса, но с разными оптимальными давлениями, на каждом из них последовательно установлена пускорегулирующая аппаратура: клапаны редукционные 21 и переливные 22. Установлены также нормально закрытый регулируемый предохранительный клапан 23, обратные клапаны 24, дренажные сливные патрубки 25, гидробак 26 для рабочей жидкости, манометр 27 на напорном трубопроводе 19, манометры 28 на гидроцилиндрах 9 [5, 6].

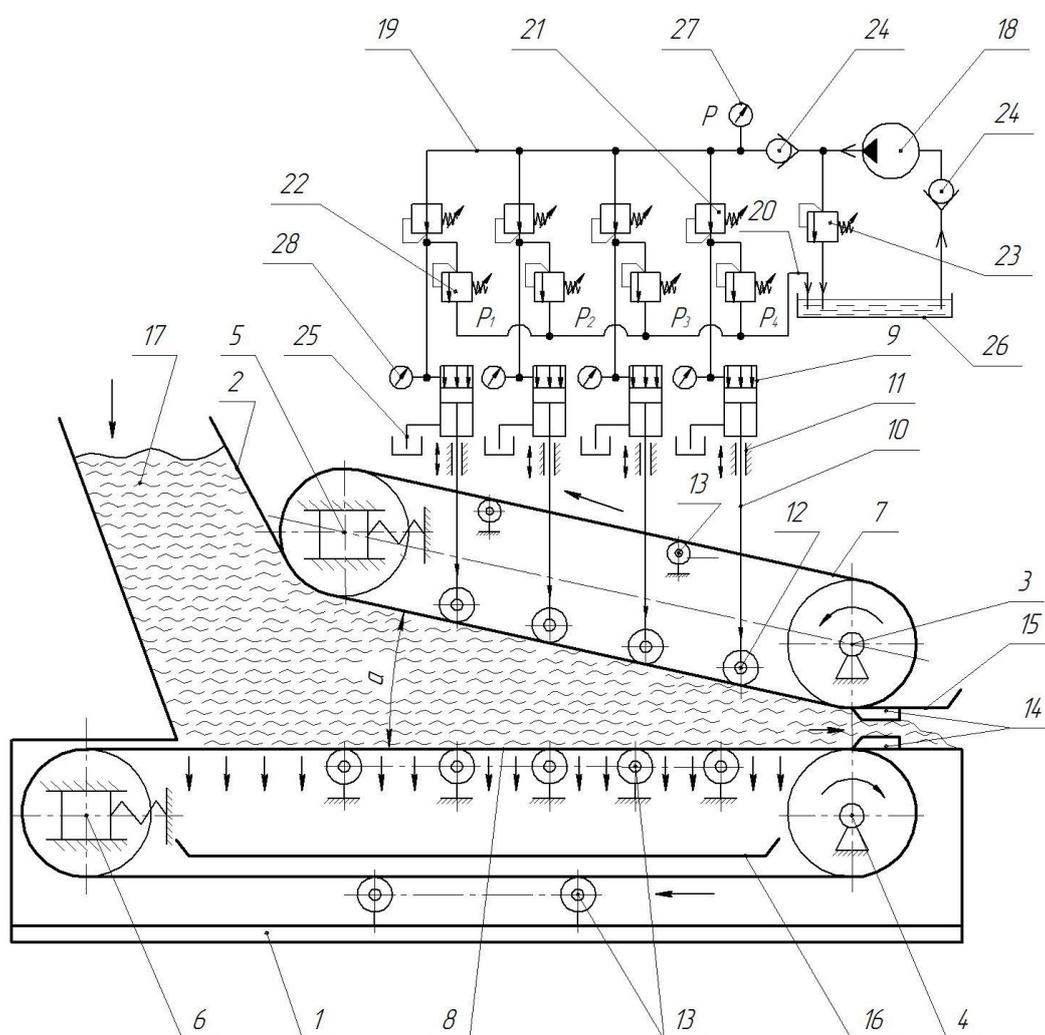


Рис. 1. Общий вид ленточного фильтр-пресса непрерывного действия

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Конструкция гидропривода и его работа должны обеспечить оптимальное возрастание давления P_i на роликах в зависимости от физико-механических характеристик отжимаемого материала, которое определяется по формуле [1]

$$P_i = A \frac{\rho P_T K_i^o}{G a_i}, \quad (1)$$

где A – коэффициент, зависящий от конструктивных параметров ленточного фильтр-пресса; ρ – плотность твердой фазы; P_T – постоянная равная давлению для полного сжатия пор материала; K_i^o – коэффициент, учитывающий сопротивление материала обезвоживанию; $G = 2q$ кг с.в./м² – нагрузка фильтровальных полотен; a_i – коэффициент уплотнения отжимаемого слоя.

Для стабильной работы пускорегулирующей аппаратуры гидроцилиндров необходимо, чтобы насос гидропривода обеспечивал постоянство его рабочих характеристик по давлению и расходу. Этим требованиям отвечает шестеренный насос. Его рабочая характеристика (рис. 2) показывает, что при увеличении давления насоса P_n расход насоса (линия АВ) незначительно уменьшается на величину утечек $q_{ум}$, т.е. в рабочей точке E давление насоса равно P_E , а действительный расход насоса Q_n равен

$$Q_n = Q_m - q_{ум}, \quad (2)$$

где Q_m – теоретическая производительность насоса.

Точка В соответствует давлению настройки предохранительного клапана.

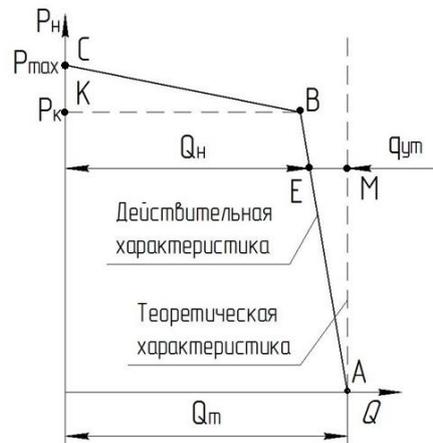


Рис. 2. Рабочая характеристика шестеренного насоса

Для получения необходимых оптимальных давлений P_i и их регулировок в гидроцилиндрах установлены нормально открытые регулируемые двухлинейные редуцирующие золотниковые клапаны 21, конструкция и работа которых показаны на рис. 3.

Известно, что редуцирующие клапаны предназначены для поддержания в некоторой части гидросистемы пониженного давления относительно давления в

основной нагнетательной магистрали и независимого от него [5, 6]. Редукционные клапаны нормально открытые, т.е. в отсутствие управляющего сигнала клапан открыт.

Редукционные клапаны бывают седельного типа и золотниковые. В клапанах первого типа при изменениях давления может возникнуть вибрация, которая будет влиять на постоянство давлений P_i в гидроцилиндрах. Поэтому в гидроприводе установлены золотниковые редукционные клапаны, в которых, вследствие выбора соответствующей конфигурации управляющих кромок золотника, вибрация отсутствует, что улучшает динамическую характеристику редукционного клапана и повышает точность регулирования и давлений P_i в гидроцилиндрах.

Редукционный клапан, нормально открытый, состоит (рис. 3) из корпуса 1, регулирующего золотника 2, который под действием пружины 3 занимает крайнее левое положение. Усилие пружины регулируется винтом 4. Клапан при этом полностью открыт.

При работе насоса рабочая жидкость через входную линию 5 заполняет полость клапана. При этом давление в выходной линии 6 передается через линию управления 7 на левую торцевую поверхность золотника.

Создаваемое на золотнике усилие уравнивается настраиванием усилия пружины. Если первое превысит второе, то золотник клапана начинает закрываться, смещаясь вправо и преодолевая усилие пружины до тех пор, пока не будет достигнуто равновесие двух сил – давление на левый торец золотника и усилие пружины, настроенное на необходимое давление редуцирования $P_{ред}$ данного гидроцилиндра. Благодаря этому дросселирующая щель уменьшается и на ней появляется перепад давления:

$$\Delta P = P - P_{ред}, \quad (3)$$

где $P_{ред}$ – редуцируемое давление для данного гидроцилиндра.

При дальнейшем повышении давления P на выходе (линия 6) золотник закрывает клапан полностью. При этом на выходе сохраняется то давление, на которое был настроен редукционный клапан $P_{ред}$, независимо от увеличения давления на входе P . При подборе манометров, показывающих давление P_i в гидроцилиндрах, величина настройки редуцируемого давления $P_{ред}$ должна соответствовать примерно 2/3 показания шкалы манометра.

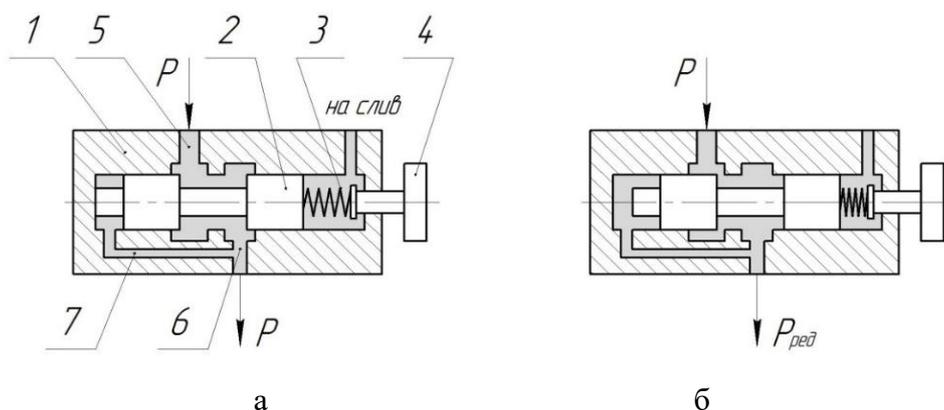


Рис. 3. Схема нормально открытого редукционного двухлинейного клапана золотникового типа: а – в исходном положении; б – в рабочем положении

Поскольку при работе фильтр-пресса давление отжима P_i в гидроцилиндрах может колебаться в зависимости от параметров фильтрующего слоя (толщина, пористость, влажность), для поддержания постоянного значения редуцируемого давления $P_{ред}$ к редуционным клапанам последовательно подключены нормально закрытые переливные клапаны (рис. 4).

Переливные клапаны предназначены для поддержания входного заданного давления путем непрерывного слива рабочей жидкости во время работы [5, 6]. Клапан состоит из корпуса 1, запорного устройства 2, которое под действием пружины 3 занимает крайнее левое положение, полностью закрывая входное отверстие при отсутствии внешнего сигнала до тех пор, пока со стороны редуционного клапана давление станет больше усилия пружины. Усилие пружины регулируется винтом 4.

При увеличении давления запорное устройство движется вправо, расход через переливной клапан увеличивается и давление уменьшается до $P_{ред}$. При уменьшении значения давления расход через клапан уменьшается, а давление увеличивается до $P_{ред}$. Таким образом, при работе гидропривода рабочая жидкость через переливные клапаны все время сливается в гидробак.

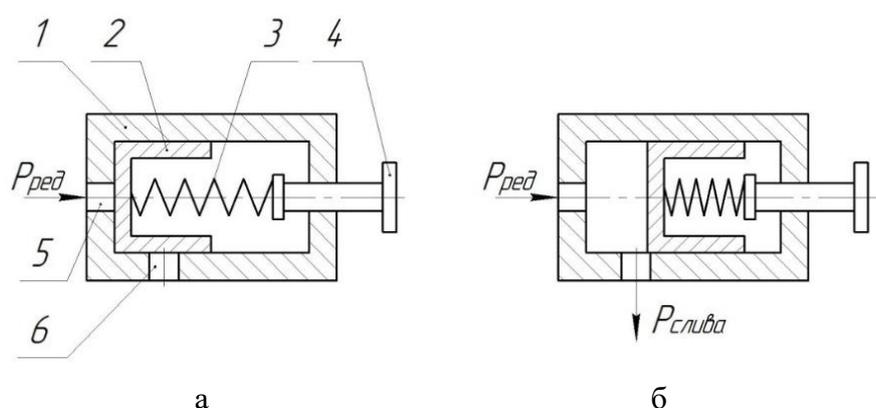


Рис. 4. Схема переливного нормально закрытого клапана:
а – в исходном положении; б – в рабочем положении

При увеличении давления P в напорном трубопроводе сверх допустимого срабатывает нормально закрытый клапан 23 (см. рис. 1), который открывается, и рабочая жидкость сливается в гидробак. При остановке насоса происходит отсечка рабочей жидкости обратными клапанами.

Работа фильтр-пресса происходит следующим образом (см. рис. 1). Вначале включают гидронасос 18 и по манометру 27 настраивают рабочее давление P в напорном трубопроводе 19 с помощью нормально закрытого регулируемого предохранительного клапана 23. Затем, в зависимости от физико-механических характеристик отжимаемого материала 17, редуционными 21 и сливными 22 клапанами по манометрам 28 настраивают рабочие давления в гидроцилиндрах 9 так, чтобы $p > p_4 > p_3 > p_2 > p_1$, т.е. с постоянным увеличением усилия отжима по мере продвижения отжимаемого материала. Далее включают приводные валы 3 и 4, после чего в бункер 2 загружают отжимаемый материал 17, который непрерывно поступает в зону отжима, откуда отфильтрованная вода с верхнего фильтровального полотна 7 стекает в поддон 15, а с нижнего фильтровального полотна 8 стекает в поддон 16, откуда вода отводится в канализацию. Отжатый материал 17 счищается с поверхности фильтровальных полотен 7 и 8 ножами 14, после чего поступает на дальнейшую переработку.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложен гидропривод с гидравлической настройкой и последующей плавной регулировкой оптимального давления на каждом гидроцилиндре с автоматическим его поддержанием в процессе работы. Конструкция гидропривода защищена патентом РФ на полезную модель.

2. Выполнен анализ и обоснованы конструкции и работа элементов пускорегулирующей аппаратуры гидропривода ленточного фильтр-пресса.

3. Предложенная конструкция гидропривода повышает качество отжимаемых материалов с различными физико-механическими характеристиками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горячев В.И. Искусственное обезвоживание торфа. Тверь: ТвГТУ, 2012. 184 с.

2. Лазарев А.В., Корчунов С.С. [и др.]. Справочник по торфу. М.: Недра, 1982. 760 с.

3. Патент РФ 187516. Ленточный фильтр-пресс непрерывного обезвоживания материала / Горячев В.И., Михеев И.И., Щербакова Д.М. Заявл. 06.11.2018. Опубл. 11.03.2019, Бюл. № 8.

4. Горячев В.И., Михеев И.И., Щербакова Д.М. Ленточный фильтр-пресс непрерывного действия с гидравлической регулировкой давления гидроцилиндров на нажимные ролики // *Труды Инсторфа*. 2018. № 18 (71). С. 42–45.

5. Башта Т.М. Гидропривод и гидропневмоавтоматика. М.: Машиностроение, 1972. 320 с.

6. Абрамов Е.И. Элементы гидропривода. Киев: Техника, 1969. 320 с.

7. Lamar R.T., Olk D.C., Mayhew L., Bloom P.R. A New Standardized Method for Quantification of Humic and Fulvic Acids in Humic Ores and Commercial Products // *Journal of AOAC International*. 2014. V. 97. № 3. P. 721–730.

8. Doskočil L., Grasse L., Valkova D., Pekar M. Hydrogen Peroxide Oxidation of Humic Acids and Lignite // *Fuel*. 2014. V. 134. P. 406–413.

ANALYSIS AND JUSTIFICATION OF DESIGNS AND WORK OF THE START-REGULATION ELEMENTS OF THE EQUIPMENT OF THE HYDRAULIC ACTUATOR OF TAPE FILTER-PRESS

I.I. MIKHEYEV, Cand. Sci., V.I. GORYACHEV, Dr. Sci.,
D.M. SCHERBAKOVA

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: dscherbakowa@yandex.ru

The article describes and justifies the design of the hydraulic drive of the continuous belt filter press. The hydraulic drive consists of hydraulic cylinders transmitting pressure to the incoming peat mass, and ballast equipment ensuring maintenance of optimum pressure in each hydraulic cylinder depending on physical and mechanical characteristics of the material being pressed. Design and operation of hydraulic equipment elements consisting of set for each hydraulic cylinder of adjustable reducing and overflow valves are considered.

Application of proposed hydraulic drive with optimization of pressure in hydraulic cylinders makes it possible to improve quality of pressing of materials with different humidity and fractional composition.

Keywords: filter press, a hydraulic actuator, the pump, hydraulic cylinders, the starting and regulating equipment, reducing valves, overflow valves, manometers.

REFERENCES

1. Goryachyov V.I. *Iskustvennoye obezvozhvaniye torfa [Artificial Dehydration of Peat]*. Tver: TSTU. 2012. 184 p.
2. Lazarev A.V. Korchunov S.S. et al. *Spravochnik po torfu [Handbook on the peat]* / V. Lazarev [et al.] Moskow: Nedra, 1982. 760 p.
3. Patent RF 187516. *Lentochniy filtr-press neprerivnogo obezvoziwaniya materiala [Tape Filter Press of Continuous dewatering of Material]* / Mikheyev I.I., Goryachyov V.I., Scherbakova D.M. Declared 06.11.2018. Published 11.03.2019. Bulletin No. 8.
4. Goryachyov V.I., Mikheyev I.I., Scherbakova D.M. Tape Filter Press of Continuous Action with hydraulic Adjustment of Pressure of hydraulic Cylinders on Pressure Rollers // *Trudy Instorfa*. 2018. No. 18 (71), pp. 42–45. (In Russian).
5. Bashta T.M. *Gidroprivod i Pnevmodiroavtomatika [Hydraulic Drive and Hydropneumodynamics]*. Moscow: Machinery Construction, 1972. 320 p.
6. Abramov V.I. *Elementi gidroprivoda [Hydraulic drive Elements]*. Kiev: Technika, 1969. 320 p.
7. Lamar R.T., Olk D.C., Mayhew L., Bloom P.R. A New Standardized Method for Quantification of Humic and Fulvic Acids in Humic Ores and Commercial Products // *Journal of AOAC International*. 2014. V. 97. No. 3, pp. 721–730.
8. Doskočil L., Grasse L., Valkova D., Pekar M. Hydrogen Peroxide Oxidation of Humic Acids and Lignite // *Fuel*. 2014. V. 134, pp. 406–413.

ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ШНЕКОВЫХ ПРЕССОВ ФРЕЗФОРМОВОЧНЫХ МАШИН ДЛЯ ДОБЫЧИ КУСКОВОГО ТОРФА

А.Л. ЯБЛОНЕВ, д-р техн. наук, А.М. ГУСЕВА, Д.М. ЩЕРБАКОВА

Тверской государственной технической университет, 170026, Тверь,
наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: alvovich@mail.ru

© Яблонев А.Л., Гусева А.М., Щербакова Д.М., 2019

Актуальность работы обусловлена необходимостью обоснования рациональных конструкций и режимов работы шнековых прессов, устанавливаемых на фрезформовочных машинах для добычи кускового торфа. Проанализированы существующие конструкции одношнековых и двухшнековых механизмов с осевым и радиальным расположением формующих мундштуков. Отмечено значительное влияние формы примундштучного перехода на энергоемкость формования и качество продукции. С использованием средств гидродинамики разработан метод расчета напора и его потерь при формовании торфомассы. Сделан вывод о том, что одношнековые пресса с шагом витков шнека, близким к половине его наружного диаметра, осевым расположением мундштуков и коническим (постепенным) переходом примундштучной части от напорной трубы к мундштуку являются более рациональными конструкциями, чем все остальные рассмотренные.

Ключевые слова: кусковой торф, формование, энергоемкость, шнековый пресс, потери напора, частота вращения шнека, осевое и радиальное расположение мундштуков.

ВВЕДЕНИЕ

Описанные в работах [1–3] исследования влияния параметров и режимов работы формующего механизма на потребительские свойства кускового торфа показали, что наиболее рациональным режимом формования с учетом минимума энергозатрат и сохранения куском требуемой плотности и прочности является режим с частотой вращения шнека $n = 220\text{--}320$ об/мин при коэффициенте напора $k_n = 2,22$ и шаге витков, близком к половине наружного диаметра шнека $D_{ш}$. Вместе с тем требуется систематический контроль получаемой продукции с внесением своевременных изменений в производственные режимы вышеуказанных машин [4, 5] для исключения потерь торфа [6]. С другой стороны, необходимо выполнить анализ конструкций шнековых прессов и разработать метод расчета формующих механизмов для обоснования рациональных конструкций по параметру развиваемого и теряемого на сопротивлении напора, что и составляет задачи данного исследования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Анализ существующих конструкций фрезформовочных машин показал, что лучшим формователем (с точки зрения простоты и качества получаемого результата) является шнековый. В настоящее время в различных отраслях промышленности наиболее широкое применение получили одношнековые прессы, в качестве определяющих параметров которых принимаются диаметр шнека $D_{ш}$ и отношение длины рабочей части шнека к его диаметру – $L/D_{ш}$. Отечественные одношнековые прессы универсального назначения для переработки термопластов изготавливаются с

отношением длины рабочей части шнека к диаметру $L/D_{ш}$, равным 20, 25 и 30. Для специальных шнековых машин отношение $L/D_{ш}$ может быть увеличено до 35 или 40. Наибольшее распространение получили машины с отношением $L/D_{ш}$, равным 20 и 25, однако в последнее время намечается тенденция к увеличению отношения $L/D_{ш}$ до 30–35, что в совокупности с увеличением угловой скорости вращения шнека приводит к существенному повышению производительности шнековых машин (прессов) [7]. Шнековые механизмы востребованы в производствах для получения формованной продукции из различного сырья.

Одношнековые варианты прессов больше распространены по сравнению с двухшнековыми в связи с надежностью и простотой конструкции, уменьшенными нагрузками на подшипники передачи и привода, а также невысокой стоимостью. В одношнековом механизме весь канал шнека заполнен материалом, поэтому возникают более благоприятные условия для формования, чем в двухшнековом экструдере [8].

В шнековых прессах одновременно сочетаются несколько функций: транспортирование материала, его резание-перетиравание-раздавливание, сжатие, гомогенизация и формование, которые осуществляются при продвижении торфа от загрузочной воронки к формующему мундштуку. В результате таких механических воздействий переработанный торф принимает следующие свойства: аморфность, пластичность, а после формования и сушки – прочность и высокую плотность. Причем торф, как и любой другой материал, попавший в загрузочную воронку шнекового пресса, постепенно продвигаясь по напорной трубе к мундштуку, тщательно перемешивается и перерабатывается, приобретая все большую однородность по дисперсности и влаге [9].

Конструкцию шнекового пресса фрезформовочной машины условно можно разделить на три зоны (рис. 1): зона загрузки, зона сжатия и зона формования.

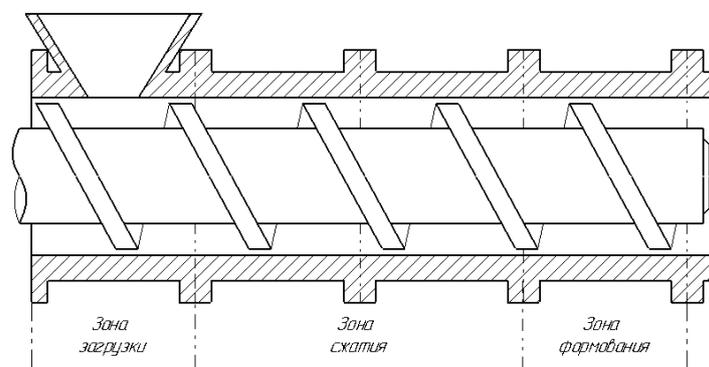


Рис. 1. Конструкция шнекового пресса фрезформовочной машины

Плотность материала начинает увеличиваться в зоне загрузки и растет на протяжении всей длины шнека. Наибольший рост плотности материала наблюдается в зоне формования. Показатель прочности формуемого материала по данным [8] начинает интенсивный рост в зоне загрузки и продолжает до определенной точки в зоне формования, затем происходит затухание его интенсивности. Как правило, после шнека устанавливаются формующие мундштуки различной формы и диаметра, где происходит уплотнение и окончательное формирование кускового торфа.

Расположение мундштуков на фрезформовочной машине возможно осевое и радиальное (рис. 2).

Согласно формуле Опейко Ф.А., напор, развиваемый шнеком [10]:

$$\sigma = 4\pi\left(1 - \frac{2R}{3S}\right)\frac{L}{S}\tau, \quad (1)$$

где R , L и S – наружный радиус, длина напорной части и шаг витков шнека соответственно; τ – тангенциальное напряжение на внутренней поверхности кожуха.

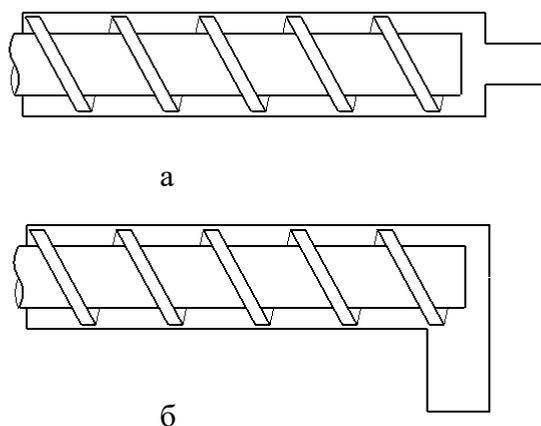


Рис. 2. Варианты расположения мундштуков фрезформовочной машины:
а – осевое; б – радиальное

По данным многочисленных исследований, зависимость напора, развиваемого шнеком от шага витков шнека, имеет параболическую форму с характерным экстремумом. Поэтому максимальный напор может быть достигнут при условии

$$\frac{d\sigma}{dS} = 0. \quad (2)$$

Продифференцировав (2) и приравняв производную нулю, получим

$$\frac{d\sigma}{dS} = \left(-4\pi\frac{L}{S^2} + \frac{8 \cdot 2}{3}\pi\frac{L \cdot R}{S^3}\right)\tau = 0, \quad (3)$$

Из (3) Ф.А. Опейко вывел оптимальное соотношение радиуса R и шага S витков шнека:

$$S = \frac{4}{3}R. \quad (4)$$

На практике [1, 7, 8, 10 и др.] шаг витков шнека принимается в пределах от $\frac{1}{2}$ до $\frac{2}{3}$ его наружного диаметра $D_{ш}$. Следует также отметить, что, несмотря на значительное удорожание конструкции, хорошие результаты достигаются при использовании шнеков с переменным шагом. В зоне загрузки, где наиболее выражены свойства транспортирования, оптимальным считается шаг витков $0,8D_{ш}$, а в зоне формования, где наибольшая осевая нагрузка на витки, – $0,5D_{ш}$ [11].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Подставляя (4) в (1), можно получить максимально возможный напор, развиваемый шнеком:

$$\sigma_{max} = 4\pi \frac{L}{\frac{4}{3}R} \left(1 - \frac{2R}{\frac{4}{3}R}\right) \tau = 4\pi \left(1 - \frac{6}{12}\right) \frac{3L}{4R} \tau = 2\pi \frac{3}{4} \frac{L}{R} \tau = \frac{3}{2} \pi \tau \frac{L}{R} = \frac{3\pi\tau L}{D_{ш}}. \quad (5)$$

С.Г. Солоповым в 1946 году для определения потерь напора в шнековых формирующих устройствах стилочных машин был впервые применен гидродинамический метод [12]. За основу проектирования формирующего аппарата были приняты положения, разработанные для гидромеханики жидких и газообразных сред. Так, для движения жидкости или газа по трубопроводу необходимо наличие давления, достаточного для преодоления динамических и статических потерь. Первые возникают от придания телу необходимой скорости, а вторые – от наличия сопротивлений местных и по длине трубопровода [12].

Сопротивление формирующего аппарата с радиальным расположением мундштука складывается:

- из сопротивления от трения в напорном шнеке;
- сопротивления повороту потока на 90°;
- сопротивления от сужения в мундштуке.

Сопротивление формирующего аппарата с осевым расположением мундштука складывается:

- из сопротивления от трения в напорном шнеке;
- сопротивления от сужения в мундштуке.

Для фрезформовочных машин справедливы следующие рассуждения. Напор, создаваемый шнеком, расходуется на потери по длине мундштука σ_l , отвечающие непосредственно за формирование куска, местные потери $\sum \sigma_m$ на местных сопротивлениях и потери, необходимые для придания скорости торфомассе при выходе ее из мундштука σ_v :

$$\sigma = \sigma_l + \sum \sigma_m + \sigma_v, \quad (6)$$

где σ_l – потери напора, создаваемого по длине трубопровода, σ_v – напор, необходимый для придания скорости торфомассе при выходе из мундштука.

Местные потери напора с учетом формулы Вейсбаха [13], Па:

$$\sigma_m = \zeta_1 \frac{v^2 \rho g}{2g} = \zeta_1 \frac{v^2 \rho}{2}, \quad (7)$$

где ζ_1 – коэффициент местного сопротивления, в данном случае – коэффициент сопротивления сужению; v – средняя скорость движения торфомассы после местного сопротивления (т.е. в мундштуке), м/с; ρ – средняя плотность торфомассы, кг/м³.

Потери напора, создаваемого по длине трубопровода, согласно формуле Дарси–Вейсбаха, Па:

$$\sigma_l = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2 \rho}{2}, \quad (8)$$

где λ – коэффициент трения вязко-пластичной среды о поверхность мундштука (или коэффициент Дарси); l – длина мундштука, м; d – диаметр мундштука, м [13].

Напор, необходимый для придания скорости торфомассе при выходе из мундштука, Па:

$$\sigma_v = \frac{v^2 \rho}{2}, \quad (9)$$

где v – средняя скорость движения торфомассы как в мундштуке, так и при выходе из мундштука, м/с [13, 14]. Здесь необходимо сделать замечание: скорости движения торфомассы при входе в мундштук, в мундштуке и при выходе из мундштука на самом деле различаются. Но поскольку это различие несущественное, нами принято допущение о равенстве средней скорости движения торфомассы.

Таким образом, общее уравнение потерь напора, развиваемого шнеком, Па, следующее:

$$\sigma = \sigma_l + \sum \sigma_m + \sigma_v = \lambda \frac{l v^2 \rho}{d} + \frac{v^2 \rho}{2} \sum \zeta + \frac{v^2 \rho}{2} = \frac{v^2 \rho}{2} (\lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta + 1), \quad (10)$$

где $\sum \zeta$ – сумма коэффициентов местных сопротивлений на всем пути торфомассы.

Математическая модель определения напора для осевого расположения мундштука с сужением примундштучной части, Па:

$$\sigma = \frac{3\pi\tau L}{D_{ш}} = \frac{v^2 \rho}{2} (\lambda \frac{l}{d} + \zeta_1 + 1). \quad (11)$$

В случае радиального расположения мундштука местные потери напора будут складываться из потерь напора на поворот потока торфомассы на 90° и потерь напора на сужение мундштука:

$$\sum \sigma_m = \sigma_{пов} + \sigma_{суж} = \zeta_2 \frac{v^2 \rho}{2} + \zeta_1 \frac{v^2 \rho}{2} = \frac{v^2 \rho}{2} (\zeta_2 + \zeta_1), \quad (12)$$

где ζ_2 – коэффициент сопротивления повороту; $\sigma_{пов}$ – потери напора на повороте потока; $\sigma_{суж}$ – потери напора от сужения.

В таком случае общее уравнение потери напора примет следующий вид:

$$\begin{aligned} \sigma = \sigma_l + \sum \sigma_m + \sigma_v &= \sigma_l + \sigma_{пов} + \sigma_{суж} + \sigma_v = \lambda \frac{l v^2 \rho}{d} + \zeta_2 \frac{v^2 \rho}{2} + \zeta_1 \frac{v^2 \rho}{2} + \frac{v^2 \rho}{2} = \\ &= \frac{v^2 \rho}{2} (\lambda \frac{l}{d} + \zeta_1 + \zeta_2 + 1), \end{aligned} \quad (13)$$

Математическая модель определения напора для радиального расположения мундштука с сужением примундштучной части, Па, будет иметь вид:

$$\sigma = \frac{3\pi\tau L}{D_{ш}} = \frac{v^2 \rho}{2} (\lambda \frac{l}{d} + \zeta_1 + \zeta_2 + 1). \quad (14)$$

Анализ уравнений (10) и (13) показывает, что в любом случае потери напора выше в шнековом прессе с радиальным расположением мундштука.

Тангенциальное напряжение на внутренней поверхности кожуха τ и коэффициент трения вязко-пластичной среды (торфомассы) о внутреннюю поверхность мундштука λ для верхового торфа со степенью разложения $R = 20$ % и влажностью $w = 82,8$ % изменяются от 8,5 до 10 кПа и от 0,03 до 0,09 соответственно для различных степеней переработки [10].

Переходная зона между мундштуком и напорной частью шнека может иметь форму резкого, постепенного и плавного сужения (рис. 3) [13].

В случае любого из перечисленных видов сужения коэффициент местного сопротивления

$$\zeta_1 = \xi \left(1 - \frac{S_2}{S_1}\right), \quad (15)$$

где S_2 – площадь живого сечения мундштука; S_1 – площадь живого сечения напорной трубы шнека; ξ – коэффициент смягчения сужения.

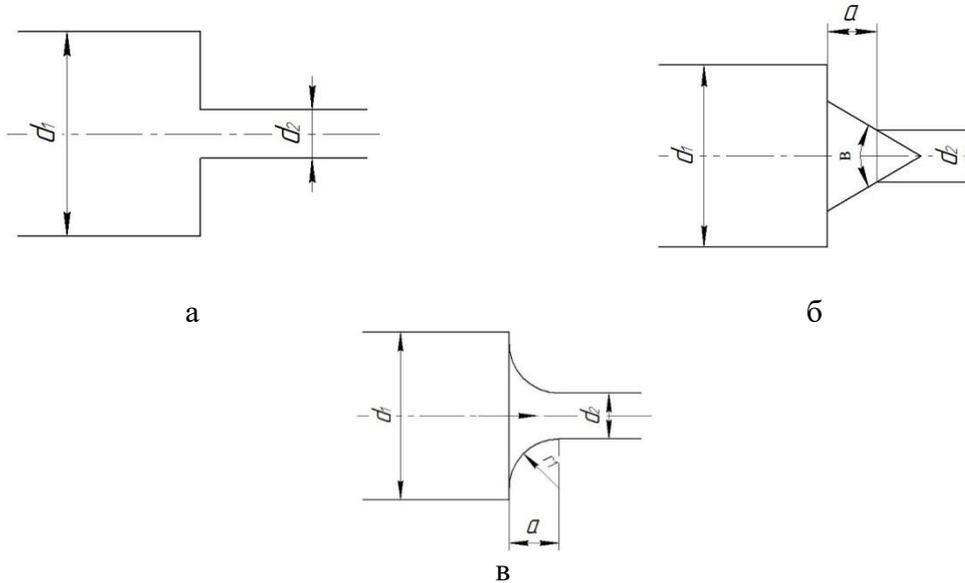


Рис. 3. Варианты переходной части напорной трубы и мундштука: а – резкое сужение; б – постепенное сужение; в – плавное сужение

Для резкого сужения (см. рис. 3а) коэффициент смягчения сужения равен 0,5. В случае постепенного сужения (см. рис. 3б) величина коэффициента смягчения сужения зависит от центрального угла сужения β , определяется по экспериментальному графику (рис. 4), причем минимальные потери напора наблюдаются при $\beta = 40\text{--}60^\circ$ при коэффициенте смягчения сужения $\xi = 0,1$. В случае плавного сужения (см. рис. 3в) величина ξ находится в зависимости от отношения r/d (где r – радиус скругления боковых стенок). Коэффициент смягчения сужения ξ достигает минимума ($\xi = 0,03$) при $r/d = 0,2$ и далее остается постоянным [13].

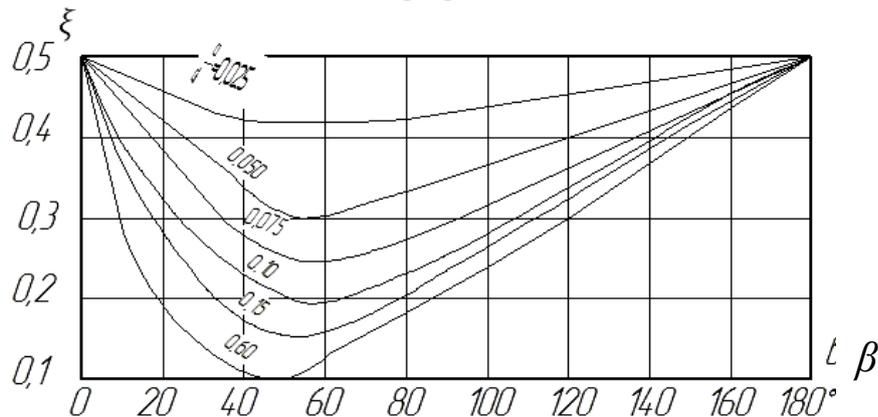


Рис. 4. Экспериментально полученная зависимость коэффициента смягчения сопротивления ξ от центрального угла сужения β в случае постепенного сужения для круглых цилиндрических труб

По форме плавного перехода примундштучной части различают мундштуки сферического и тороидального сечения (рис. 5).

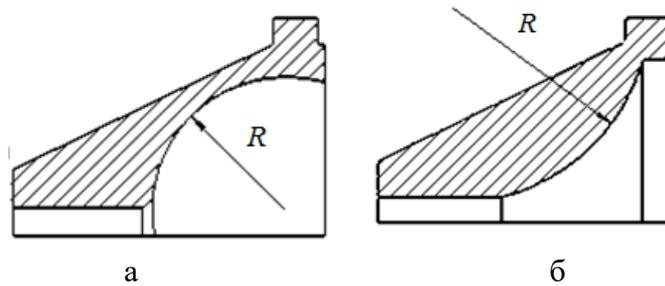


Рис. 5. Варианты исполнения плавного перехода примундштучной части фрезеровочной машины: а – сферическое; б – тороидальное

По экспериментальным данным [15], тороидальная форма плавного перехода примундштучной части обеспечивает минимальную энергоёмкость процесса прессования. С другой стороны, тороидальная форма описывается радиусом окружности и являет собой ту же сферу. По этим же данным применение переходной примундштучной части прессы тороидального сечения может улучшить качество формируемой торфомассы, но одновременно происходит снижение ее угловой и линейной скоростей движения, что может негативно сказываться на производительности машины в целом.

Вместе с тем следует отметить, что изготовление и сферических, и тороидальных переходов намного увеличит стоимость машины. Поэтому наиболее рациональным решением следует считать применение конических (постепенных) переходов.

Оптимальная длина мундштука l исследована в работах В.И. Цветкова и В.К. Фомина. Этими авторами отмечено, что для улучшения качества формования мундштук должен работать полной длиной, и экспериментально установлено, что при скорости истечения торфомассы до 2 м/с оптимальной является длина мундштука

$$l = 3 \div 4d, \quad (16)$$

где d – внутренний диаметр мундштука.

Любые сопротивления, кроме потерь напора по длине, уменьшают рабочую длину мундштука. Их вид напрямую определяет характер движения и линии тока торфомассы в мундштуке (рис. 6).

В зависимости от варианта расположения мундштука (осевого или радиального) меняется физика процесса истечения торфомассы. Как видно из рис. 6, мундштук работает большей длиной при плавном переходе из напорной трубы. В случае любого сужения (рис. 6) в начальном участке мундштука формируются зоны с пониженной плотностью и давлением торфомассы, а в торцевых внутренних углах напорной трубы создаются зоны завихрения и налипания торфомассы. Максимальные потери рабочей длины мундштука наблюдаются в случае поворота на 90° , т.е. в случае радиального расположения мундштука при коэффициенте сопротивления для мундштука круглого сечения $\zeta = 1,1$ [13, 14].

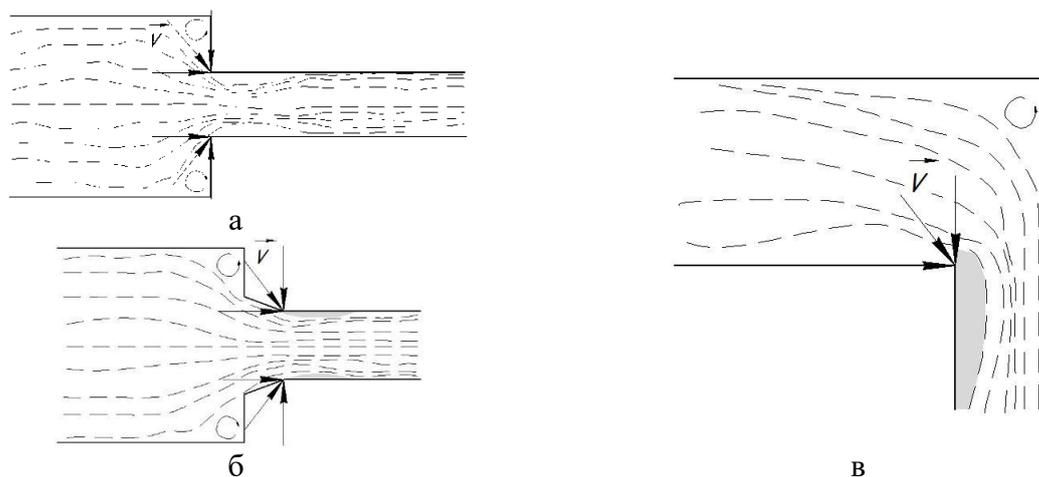


Рис. 6. Траектория движения частиц (линии тока торфомассы) в зависимости от расположения мундштука: а – осевое с резким сужением; б – осевое с постепенным сужением; в – радиальное с резким сужением

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Формование обеспечивается сопротивлением по длине мундштука, а все местные сопротивления снижают напор. Любое сужение (или поворот) снижает рабочую длину (зону действия) мундштука и увеличивает местные сопротивления. Таким образом, наиболее рациональным с точки зрения простоты исполнения, обеспечения качества формования и минимума энергозатрат является осевое расположение мундштука (или мундштуков (рис. 7)) с коническим переходом от напорной трубы к мундштуку с центральным углом сужения $\beta = 40\text{--}60^\circ$.

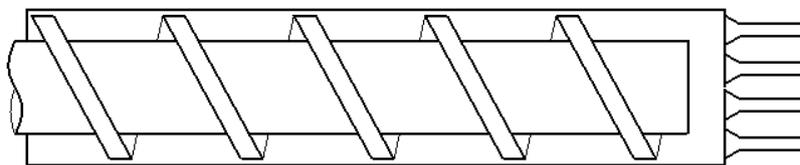


Рис. 7. Конструктивное исполнение постепенного перехода примундштучной части многопоточных мундштуков осевого расположения фрезформовочной машины для добычи кускового торфа

Фрезформовочные машины для стилки кускового торфа внаброс с осевым расположением многопоточных мундштуков и постепенным (коническим) переходом примундштучной части в мундштуки (см. рис. 7) обеспечат снижение потерь напора при производстве кускового торфа, а соответственно, снизят энергоемкость процесса формования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Яблонев А.Л., Гусева А.М. Определение энергоемкости процесса формования кускового торфа // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2019. № 1 (1). С. 36–45.
2. Яблонев А.Л., Гусева А.М. Экспериментальное обоснование рациональных режимов производства кускового торфа // *Горный информационно-аналитический журнал*. 2019. № 4 (4). С. 10–15.

бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № 2. С. 163–171. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-02-0-163-171.

3. Yablonev A., Guseva A. Justification of Screw Press Rational Parameters and its Working Modes during Sod Peat Extraction by Milling-Forming Method. *E3S Web of Conferences «IV International Innovative Mining Symposium»*. 2019. V. 105. P. 01033. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910501033>

4. Misnikov O. Basic Technologies and Equipment Used for Peat Deposits Development in Foreign Countries. *E3S Web of Conferences «III-d International Innovative Mining Symposium»*. 2018. V. 41. P. 01046. DOI: 10.1051/e3sconf/20184101046

5. Панов В.В., Мисников О.С., Купорова А.В. Проблемы и перспективы развития торфяного производства в Российской Федерации // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2017. № 5. С. 105–117.

6. Kremcheev E.A., Kremcheeva D.A. Technological Approaches to Reducing the Loss of Peat Raw Materials in Fields with Hydrological Regime // *Indian Journal of Science and Technology*. 2016. V. 9. № 12. P. 89525.

7. Соколов М.В., Клинков А.С., Ефремов О.В. Автоматизированное проектирование и расчет шнековых машин: монография. М.: Машиностроение-1, 2004. 248 с.

8. Тимофеева Д.В., Попов В.П., Антимонов С.В., Занюхина А.Г. Разработка конструкции шнека типового пресс-экструдера // *Вестник ОГУ*. 2014. № 9 (170). С. 220–225.

9. Singh R.K., Das A. Analysis of Separation Response of Kelsey Centrifugal Jig in Processing Fine Coal. *Fuel Processing Technology*. 2013. V. 115. P. 71–78.

10. Опейко Ф.А. Торфяные машины. Минск: Вышэйшая школа, 1968. 408 с.

11. Припоров И.Е. Обоснование винтовой поверхности шнека переменного шага пресс-экструдера // *Известия Оренбургского гос. аграрного ун-та. Серия «Технические науки»*. 2017. № 1 (63). С. 67–70.

12. Солопов С.Г. Аэродинамический метод оценки конструкций формовальных аппаратов для пластинного торфа // *Торфяная промышленность*. 1946. № 1. С. 30–32.

13. Чугаев Р.Р. Гидравлика (техническая механика жидкости). Л.: Энергия. 1971. 552 с.

14. Лапшев Н.Н. Гидравлика. М.: Академия, 2008. 272 с.

15. Епифанцев К.В., Михайлов А.В., Гладких А.В. Производство кускового торфа, экструдирование, форма заходной и калибрующей части фильеры матрицы, метод дискретных элементов // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-техн. журнал)*. 2012. № 3. С. 212–219.

JUSTIFICATION OF SCREW PRESS RATIONAL STRUCTURES FROM MILLING-FORMING MACHINES FOR SOD PEAT EXTRACTION

A.L. YABLONEV, Dr. Sci., A.M. GUSEVA, D.M. SCHERBAKOVA

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: alvovich@mail.ru

The actuality of the work is conditioned by the need to justify the rational structures and modes of operation of screw presses, installed on milling-forming machines for the extraction of sod peat. The existing structures of single-screw and two-screw mechanisms with axial and radial arrangement of forming nozzles are analyzed. There is a significant

impact of the form of the pre-nozzle transition on the energy intensity of forming and product quality. Using hydrodynamics, a method has been developed to calculate the pressure and its losses in the formation of peatmass. It is concluded that the single-screw press with a step of the snare's turns close to half of its outer diameter, the axial arrangement of nozzles and the conical (gradual) transition of the pre-nozzle part from the pressure pipe to the nozzle are more rational designs than all the others reviewed.

Keywords: sod peat, forming, energy intensity, screw press, loss of pressure, screw rotational speed, axial and radial arrangement of nozzles.

REFERENCES

1. Yablonev A.L., Guseva A.M. Determination of the Intensity of the Molding Process of Sod Peat. *Vestnik TvGTU. Seriya «Tehnicheskije nauki»*. 2019. No. 1, pp. 36–45. (In Russian).
2. Yablonev A.L., Guseva A.M. Experimental Substantiation of Rational Modes of Production of Sod Peat. *Gornyy Informatsionno-analiticheskiy Byulleten*. 2019, No. 2, pp. 163–171. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-02-0-163-171. (In Russian).
3. Yablonev A., Guseva A. Justification of Screw Press Rational Parameters and its Working Modes during Sod Peat Extraction by Milling-Forming Method. *E3S Web of Conferences «IV International Innovative Mining Symposium»*. Vol. 105. 2019. P. 01033. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910501033>.
4. Misnikov O. Basic Technologies and Equipment Used for Peat Deposits Development in Foreign Countries. *E3S Web of Conferences «III-d International Innovative Mining Symposium»*. Vol. 41. 2018. P. 01046. DOI: 10.1051/e3sconf/20184101046.
5. Panov V.V., Misnikov O.S., Kuporova A.V. Problems and Prospects of Development of Peat Production in the Russian Federation. *Gornyy Informatsionno-analiticheskiy Byulleten*. 2017, No. 5, pp. 105–117. (In Russian).
6. Kremcheev E.A., Kremcheeva D.A. Technological Approaches to Reducing the Loss of Peat Raw Materials in Fields with Hydrological Regime. *Indian Journal of Science and Technology*. 2016. V. 9. No 12, p. 89525.
7. Sokolov M.V., Klinkov A.S., Yefremov O.V. Avtomatizirovannoye proektirovaniye i raschet shnekovih mashin: monografiya [Automated Design and Calculation of Screw Machines: monograph]. Moscow: Mashinostroyeniye-1, 2004. 248 p.
8. Timofeeva D.V., Popov V.P., Antimonov S.V., Zanhina A.G. Development of the Design of the Screw of the Press-extruder. *Vestnik OGU*. 2014. No 9 (170), pp. 220–225. (In Russian).
9. Singh R.K., Das A. Analysis of Separation Response of Kelsey Centrifugal Jig in Processing Fine Coal. *Fuel Processing Technology*. 2013. V. 115, pp. 71–78.
10. Opeyko F.A. Torfyaniye mashini [Peat Machines]. Minsk: Visshaya shkola, 1968. 408 p.
11. Priporov I.V. Justification of Press-extruder's Alternating Step Screw Surface. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. Seriya «Tehnicheskije nauki»*. 2017. No 1 (63), pp. 67–70. (In Russian).
12. Solopov S.G. An Aerodynamic Method of Assessing the Designs of Forning Devices for Plate Peat. *Torfyaniya promishlennost*. 1946. No 1, pp. 30–32. (In Russian).
13. Chugaev R.R. Gidravlika (Tehnicheskaya mehanika zhidkosti) [Hydraulics (Technical Fluid Mechanics)]. Leningrad: Energiya, 1971. 552 p.
14. Lapshev N.N. Gidravlika [Hydraulics]. Moscow: Akademiya, 2008. 272 p.
15. Epifantsev K.V., Mikhaylov A.V., Gladkih A.V. Production of Sod Peat, Extrudation, Form of the Rear and Calibration Part of the Filler Matrix, the Method of Discrete Elements. *Gornyy Informatsionno-analiticheskiy Byulleten*. 2012. No 3, pp. 212–219. (In Russian).

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ПОЛУНАТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ПРИ ПРЕПОДАВАНИИ ДИСЦИПЛИНЫ
«ТЕОРИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ»**

К.В. ФОМИН, д-р техн. наук, К.С. КРЫЛОВ, канд. техн. наук,
В.Е. ХАРЛАМОВ, канд. техн. наук, И.К. МОРОЗИХИНА, канд. техн. наук

Тверской государственной технической университет (ТвГТУ).
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: fomin_tver@mail.ru

В статье рассмотрено применение методов полунатурного моделирования при преподавании дисциплины «Теория двигателей внутреннего сгорания». При этом сочетаются преимущества математического и натурального моделирования. Разработаны методические основы преподавания дисциплины для студентов технических специальностей с применением лабораторных исследований ДВС. Изучение двигателя на практических занятиях на базе стенда будет способствовать развитию у студентов профессиональных навыков и умений, которые в дальнейшем будут ими использованы в профессиональной деятельности.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, лабораторный стенд, полунатурное моделирование, математическое моделирование, методика обучения.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в Тверском государственном техническом университете на кафедре «Механизация природообустройства и ремонт машин» в учебном процессе используется стенд «Рабочие процессы дизельных двигателей внутреннего сгорания с электронным нагружающим устройством». Он позволяет проводить лабораторные и научно-исследовательские работы, связанные с изучением скоростных и нагрузочных характеристик ДВС, исследованием их режимов работы.

Сочетание лабораторных работ с методами теоретического изучения дает положительные результаты: учебный материал становится доступнее, шире используются знания из смежных наук, совершенствуются навыки работы, развивается информационно-коммуникационная компетентность [1, 3].

При изучении сложных систем, в том числе и ДВС, широкое применение нашли методы полунатурного моделирования, когда используются два типа систем. Первая представляет собой реальный, натуральный объект. Вторая – модель, реализованная с помощью компьютера, которая должна создавать имитацию действительных условий работы исследуемой системы [2–4].

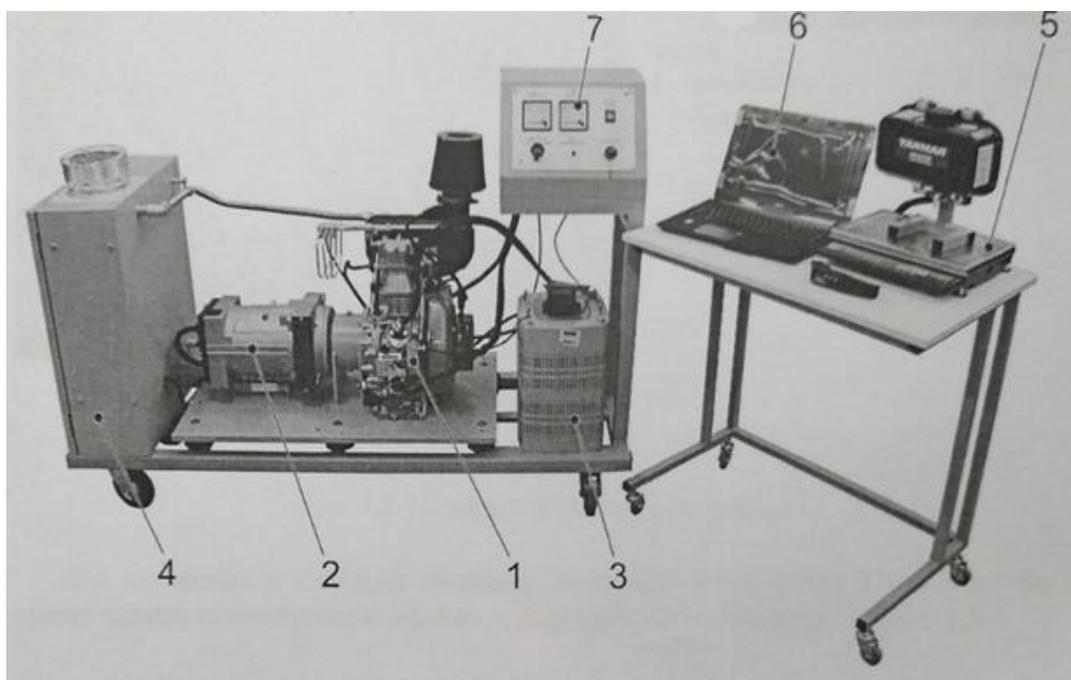
В процессе полунатурного моделирования используются преимущества математического и натурального моделирования, при этом они дополняют друг друга, взаимодействуя и обеспечивая моделирование различных условий проведения эксперимента [2, 4].

Применение лабораторных стендов в учебном процессе при изучении дисциплины «Рабочие процессы двигателей внутреннего сгорания с электронным нагружающим устройством», а также разработка методических основ ее преподавания являются актуальными задачами.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Стенд состоит из двигателя внутреннего сгорания, моделирующего вычислительного комплекса и устройства сопряжения. Он создан с применением современного оборудования и программного обеспечения для организации обучения студентов и проведения исследовательских работ [4, 5]. Моделирование позволяет проводить различные испытания, гибко перестраивать условия проведения экспериментов.

Оборудование лабораторного стенда. На рисунке представлено оборудование для изучения ДВС, который состоит: из двигателя (блок цилиндров, картер, топливный насос высокого давления, клапанная коробка, воздушный фильтр, стартер с ключом зажигания); нагрузочного блока (бак с маслом, шестеренчатый насос, дроссель, маслопроводы); электронного блока для записи показаний датчиков с выводом на экран ноутбука; электронных весов для записи расхода топлива (часового и удельного) и др. [4, 5].



Автоматизированный лабораторный стенд «Рабочие процессы дизельных двигателей внутреннего сгорания с электронным нагружающим устройством» АЛК «РПДД-1Э»:

- 1 – поршневой двигатель; 2 – нагрузочный генератор; 3 – ЛАТР;
- 4 – шкаф с нагревательными элементами; 5 – весы с топливным баком;
- 6 – ЭВМ; 7 – панель управления

Для измерения крутящего момента коленчатого вала двигателя и частоты его вращения в установке используется специальная тензометрическая балка, воспринимающая реактивный момент на корпусе гидравлического тормоза [4, 5].

Лабораторное оборудование предназначено для проведения комплекса теоретических, практических и лабораторных работ по изучению конструкции, принципов работы и испытаний ДВС и обеспечивает изучение [4, 5]:

- методов испытаний дизелей и измерительной аппаратуры;
- методов оценки эффективных показателей двигателя;
- методов оценки показателей их экономичности;

методов оценки экологических показателей;
 методов термометрирования двигателя;
 методов оценки параметров устройств газообмена;
 основных принципов и правил проведения технического обслуживания.

Блок математического моделирования. Включает в себя блоки моделирования внешних воздействий на валу ДВС и обработки результатов исследования и их анализа. Он осуществляет воспроизведение дискретных последовательностей, имитирующих непрерывные случайные функции с заданными вероятностными характеристиками. Один из возможных путей получения значений реализаций процесса основан на линейном преобразовании стационарного набора независимых чисел X_k , имеющих нормальную плотность распределения с математическим ожиданием, равным нулю, и дисперсией, равной единице, в последовательность чисел Y_k , коррелируемых по заданному закону [6, 7]:

$$m_1 \{Y_m Y_{m+1}\} = K(l\Delta t),$$

где $m_1 \{ \}$ – знак усреднения; Δt – шаг дискретизации; $K(\tau)$ – корреляционная функция моделируемого процесса.

При этом оператор соответствующего линейного преобразования записывается в виде [7]

$$Y_m = \sum_{k=-P}^P a_k X_{m-k},$$

Весовые коэффициенты a_k могут быть определены с учетом спектральной плотности $S(\omega)$ моделируемого процесса [7]:

$$a_{-k} = a_k = \frac{\Delta t}{\pi} \int_0^{\pi/\Delta t} \left[\frac{2\pi}{\Delta t} S(\omega) \right]^{0.5} \cos(k\Delta t\omega) d\omega.$$

Шаг дискретизации Δt и число членов ряда P выбирается из условия [5]

$$\left| 1 - \frac{1}{\sigma_Y^2} \sum_{k=-P}^P a_k^2 \right| \leq \varepsilon,$$

где ε – допустимая погрешность; $\sigma_Y^2 = K(0)$ – дисперсия процесса.

После моделирования внешних воздействий, нагружения двигателя и получения результатов измерения рассчитываются статистические оценки их вероятностных характеристик, строится скоростная характеристика, определяются величина недоиспользования мощности и другие характеристики [7, 8].

Используя N значений реализаций измеренных параметров Z_n , где n – число измеряемых параметров, характеризующих работу ДВС, определяют оценки для одномерной функции распределения $\hat{F}(z)$ и одномерной плотности вероятности $\hat{w}(z)$ по формулам [7]:

$$F(z) \approx \hat{F}(z) = \frac{1}{N} N(z);$$

$$w(z) \approx \hat{w}(z) = \frac{\hat{F}(z + \Delta_1 z) - \hat{F}(z - \Delta_2 z)}{\Delta_1 z + \Delta_2 z},$$

где $N(z)$ – число элементов, меньших z . Принимая $\Delta_1 z = \Delta_2 z = 0,5\Delta z$ для оценки плотности вероятности, получим выражение

$$\hat{w}(z) = \frac{\hat{F}(z_+) - \hat{F}(z_-)}{\Delta z},$$

где $z_+ = z + \frac{1}{2}\Delta z$ и $z_- = z - \frac{1}{2}\Delta z$.

Близость эмпирического распределения к теоретическому оценивают при помощи статистических критериев согласия [8].

Оценки математического ожидания, корреляционной функции и спектральной плотности определяют по формулам [7, 8]:

$$\hat{m}_z = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N Z_n;$$

$$\hat{K}_z(l) = \frac{1}{N - |l|} \sum_{m=1}^{N-|l|} (Z_m - \hat{m}_z)(Z_{m+|l|} - \hat{m}_z);$$

$$\hat{S}_z(\omega) = \frac{1}{2\pi N} (U_c^2 + U_s^2),$$

где $U_c = \sum_{n=1}^N Z_n \cos n\omega$ и $U_s = \sum_{n=1}^N Z_n \sin n\omega$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На основании результатов проведения экспериментов производится вычисление параметров, определяющих показатели работы двигателя.

Эффективная мощность является одним из его основных энергетических показателей [9]:

$$N_e = \frac{Mn}{9550},$$

где M – вращающий момент, Н · м; n – частота вращения коленчатого вала, мин⁻¹.

Измерение расхода топлива осуществляется с помощью весового способа. Он заключается в определении времени, в течение которого двигатель расходует определенное массовое количество топлива.

Для этого система топливоподачи снабжена системой топливопроводов, топливным вентилем и измерительной емкостью.

Метод заключается в следующем [5]. На исследуемом установившемся режиме работы двигателя, характеризующемся относительной стабильностью измеряемых параметров, выполняется замер расхода определенной порции топлива. Оценка часового расхода топлива выполняется по следующей зависимости [5, 9]:

$$G_T = 3,6 \frac{\Delta G_T}{\tau_T},$$

где G_T – часовой расход топлива, кг/ч; ΔG_T – заданная масса топлива, израсходованная двигателем, г; τ_T – время расходования заданной массы топлива, с.

Измерение расхода воздуха производится с помощью датчика массового расхода. Его значение необходимо для определения коэффициентов наполнения и избытка воздуха ДВС. Электронный датчик смонтирован во впускной системе двигателя и размещен между фильтром очистки впускным трубопроводом двигателя [4, 5]. В проточной части расположен нагревательный элемент, температура и, соответственно, электрическое сопротивление которого изменяются в зависимости от потребления воздуха [4, 5]. Подобный способ регистрации расхода воздуха позволяет оценивать его значение во всем диапазоне режимов работы двигателя (включая переходные режимы) и обрабатывать результаты испытаний на ЭВМ [4, 5].

Температура и давление свежего заряда и отработавших газов используются при оценке гидравлического сопротивления системы впуска свежего заряда и выпуска отработавших газов [4, 5]. Указанные параметры потока необходимы также при выполнении теплового расчета двигателя и анализа теплового баланса.

Для оценки температур и давлений потоков лабораторная установка оборудована термопарами и приемниками давления, размещенными в магистрали движения свежего заряда и отработанных газов [4, 5].

Температура и давление свежего заряда регистрируются в сечении впускного тракта. В этом случае возможна регистрация величины разряжения, позволяющая оценить величину гидравлического сопротивления впускной системы [4, 5].

Температура и давление отработанных газов регистрируются в сечении выпускного тракта, расположенного на выходе из выпускного канала крышки цилиндра, непосредственно перед глушителем [4, 5]. Для оценки гидравлического сопротивления системы снижения шума в сечении за глушителем установлены дополнительные приемники давления.

Построение скоростной характеристики двигателя с учетом действия переменного случайного момента нагружения осуществляется на основе оценки плотности распределения угловой скорости двигателя, определяемой с помощью выражения, данного выше. Для этого по оси ординат откладываются значения среднего момента m_n , а по оси абсцисс – значение средней угловой скорости коленчатого вала при заданном значении m_n [10–12]:

$$m_\omega = \int_0^\infty \omega_\delta w(\omega_\delta) d\omega_\delta,$$

где оценка плотности распределения угловой скорости $w(\omega_\delta)$ рассчитывается с помощью (1) при заданном значении момента и дисперсии.

Результаты экспериментов дают возможность оценить влияние динамических свойств двигателя и характер нагрузок на технико-экономические показатели его работы, такие как средняя скорость коленчатого вала, средний расход топлива, величина недоиспользования мощности [10–12].

Также могут быть определены вероятность работы на безрегуляторной ветви P_b и вероятность потери устойчивости работы P_g :

$$P_b = \int_{\omega_0}^{\omega_m} w(\omega_\delta) d\omega_\delta, \quad P_g = \int_0^{\omega_0} w(\omega_\delta) d\omega_\delta,$$

где ω_m – угловая скорость, соответствующая концу корректорного участка характеристики; ω_0 – угловая скорость, соответствующая минимально устойчивому режиму работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение методов полунатурного моделирования сочетает в себе плюсы математического и физического моделирования. Они дополняют друг друга, взаимодействуя и обеспечивая моделирование различных условий проведения эксперимента. При этом уменьшаются затраты на разработку и эксплуатацию лабораторных стендов, повышается качество обучения.

Разработаны методические основы преподавания дисциплины «Теория двигателей внутреннего сгорания» для студентов технических специальностей с применением лабораторных исследований ДВС.

Изучение двигателя на практических занятиях на базе стенда будет способствовать развитию у студентов профессиональных навыков и умений, которые в дальнейшем будут ими использованы в профессиональной деятельности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Наумкин Н.И. Инновационные методы обучения в техническом вузе. Саранск: Мордовский университет, 2007. 122 с.
2. Овчинников М.Ю., Дегтярев А.А. Применение компьютерных технологий при изучении теоретической механики и исследовании динамики сложных механических систем: учеб.-метод. пособие. М.: МФТИ. 2007. 56 с.
3. Долинина О.Н. Современные методы преподавания для студентов инженерных направлений: монография. Саратов: Саратовский государственный технический университет. 2014. 184 с.
4. Лабораторные стенды ДВС. URL: http://labstand.ru/catalog/02_02_labortornye_stendy_dvs (дата обращения: 8.10.2019).
5. Киреев Б.Н. Методика использования учебного стенда «Рабочие процессы дизельных ДВС» в лабораторном практикуме // *Инновации в науке*. 2018. № 6 (82). С. 32–37.
6. Васильев К.К., Служивый М.Н. Математическое моделирование систем: учебное пособие. Ульяновск: УлГТУ. 2008. 170 с.
7. Вибрации в технике: справочник. Т. 1. Колебания линейных систем / под ред. В.В. Болотина. М.: Машиностроение. 1978. 352 с.
8. Светлицкий В.А. Случайные колебания механических систем. М.: Машиностроение. 1976. 216 с.
9. Шароглазов Б.А., Фарафонов М.Ф., Клементьев В.В. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчет процессов: учебник по курсу «Теория рабочих процессов и моделирование процессов в двигателях внутреннего сгорания». Челябинск: ЮУрГУ. 2005. 403 с.

10. Кутьков Г.М. Тяговая динамика трактора. М.: Машиностроение. 1980. 215 с.

11. Самсонов Л.Н., Фомин К.В. Элементы статистической динамики торфяных фрезерующих агрегатов: учебное пособие для вузов. Тверь: Тверской государственный технический университет. 2005. 168 с.

12. Фомин К.В., Крылов К.С., Харламов В.Е. Методика оценки скоростной характеристики двигателя трактора торфяного фрезерующего агрегата при выполнении технологической операции // *Труды Инсторфа*. 2016. № 14 (67). С. 33–40.

**APPLICATION OF SEMI-NATURAL MODELLING METHODS
WHEN TEACHING THE DISCIPLINE
«THEORY OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES»**

K.V. FOMIN, Dr. Sci., K.S. KRYLOV, Cand. Sci., V.E. HARLAMOV, Cand. Sci.,
I.K. MOROZIKHINA, Cand. Sci.

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: fomin_tver@mail.ru

The article discusses the application of methods of semi-natural modeling in teaching the discipline «Theory of internal combustion engines». In the process of semi-natural modeling, the advantages of mathematical and field modeling are successfully combined, and the optimal interaction between computational and full-scale experiments can be achieved. The methodological foundations of teaching the discipline for students of technical specialties with the practical application of laboratory research of internal combustion engines have been developed. Studying the engine in practical exercises on the basis of the stand will contribute to the development of students' professional skills and abilities, which will be further used by them in their professional activities.

Keywords: internal combustion engine, laboratory stand, semi-natural simulation, mathematical simulation, training methodology.

REFERENCES

1. Naumkin N.I. Innovatsionnyye metody obucheniya v tekhnicheskoy vuzе [Innovative teaching methods in a technical university]. Saransk: Izd-vo Mordov. Un-ta, 2007. 122 p.

2. Ovchinnikov M.Yu., Degtyarov A.A. Primeneniye komp'yuternykh tekhnologiy pri izuchenii teoreticheskoy mekhaniki i issledovanii dinamiki slozhnykh mekhanicheskikh sistem: ucheb.-metod [The use of computer technology in the study of theoretical mechanics and the study of the dynamics of complex mechanical systems: textbook]. Posobiye. M.: MFTI. 2007. 56 p.

3. Dolinina O.N. Sovremennyye metody prepodavaniya dlya studentov inzhenernykh napravleniy: monografiya [Modern teaching methods for engineering students]. Saratov: Sarat. gos. tekhn. un-t. 2014. 184 p.

4. Laboratornyye stendy DVS: [sayt] URL: http://labstand.ru/catalog/02_02_laboratornyye_stendy_dvs (data obrashcheniya: 8.10.2019).

5. Kireyev B.N. The methodology of using the training stand «Work processes of diesel engine» in a laboratory workshop // *Innovatsii v nauke*. 2018. No 6 (82), pp. 32–37. (In Russian).

6. Vasil'yev K.K., Sluzhivyy M.N. Matematicheskoye modelirovaniye sistem: uchebnoye posobiye [Mathematical modeling of systems: a training manual]. Ul'yanovsk: UIGTU. 2008. 170 p.
7. Vibratsii v tekhnike: spravochnik. T. 1. Kolebaniya lineynykh system [Vibration in technology: a reference. T.1. Oscillations of linear systems] / Pod red. V.V. Bolotina. Moscow: Mashinostroyeniye. 1978. 352 p.
8. Svetlitskiy V.A. Sluchaynyye kolebaniya mekhanicheskikh system [Random vibrations of mechanical systems]. Moscow: Mashinostroyeniye. 1976. 216 p.
9. Sharoglazov B.A., Farafontov M.F., Klement'yev V.V. Dvigateli vnutrennego sgo-raniya: teoriya, modelirovaniye i raschot protsessov: Uchebnik po kursu «Teoriya rabochikh protsessov i modelirovaniye protsessov v dvigatelyakh vnutrennego sgoraniya» [Engines of internal combustion: theory, modeling and calculation of processes: Textbook on the course «Theory of working processes and modeling of processes in internal combustion engines»]. Chelyabinsk: Izd. YUUrGU. 2005. 403 p.
10. Kut'kov G.M. Tyagovaya dinamika traktora [Traction dynamics of a tractor]. Moscow: Mashinostroyeniye. 1980. 215 p.
11. Samsonov L.N., Fomin K.V. Elementy statisticheskoy dinamiki torfyanykh freze-ruyushchikh agregatov. Uchebnoye posobiye dlya vuzov [Elements of the statistical dynamics of peat milling aggregates]. Tver': Tverskoy gosudarstvennyy tekhnicheskij universitet. 2005. 168 p.
12. Fomin K.V., Krylov K.S., Kharlamov V.Ye. Methodology for evaluating the speed characteristics of a tractor engine of a peat milling unit when performing a technological operation // *Trudy Instorfa*. 2016. № 14 (67), pp. 33–40. (In Russian).

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 681.5.01

МЕТОД «НАДУВНОГО ШАРИКА» ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ВЕКТОРНОЙ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ С НЕЛИНЕЙНЫМИ ЦЕЛЕВЫМИ ФУНКЦИЯМИ

Г.Б. БРОНФЕЛЬД, канд. техн. наук

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: stolem1985@gmail.com

© Бронфельд Г.Б., 2019

Рассмотрена история возникновения и развития метода «надувного шарика» (МНШ) с периода создания автоматизированной системы управления технологическим процессом производства листов из термопластов на Нелидовском заводе пластмасс для задачи планирования работы комплекса агрегатов. Описан подход к постановке задач многокритериальной оптимизации с переналадками оборудования и нелинейными критериями оптимизации. Формулировка задачи восходит к идеям Л.В. Канторовича. Учет в постановке переналадок оборудования усложняет задачу. Описан МНШ для решения поставленной задачи. Алгоритм МНШ основан на итерационном методе. В МНШ включены дополнительный специальный метод закрепления классов, метод максимального элемента и метод ветвей и границ. Изложены некоторые рекомендации для решения широкого класса задач с помощью МНШ, включая задачи направления «искусственный интеллект».

Ключевые слова: оптимизация, многокритериальность, метод надувного шарика, метод максимального элемента, метод ветвей и границ, итеративный метод, планирование производства.

ВВЕДЕНИЕ

В 1971–74 гг. на Нелидовском заводе пластмасс Калининской области (теперь Тверская) разрабатывалась и внедрялась автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУТП) производства листов из термопластов. Управляемый цех обеспечивал листом из полистирола около 70 % производства холодильников в СССР и АВС-пластиком производство легковых автомобилей «Жигули» в Тольятти. Она оказалась первой АСУТП в подотрасли переработки пластмасс в химической промышленности СССР на основе управляющей ЭВМ третьего поколения 1010Б венгерского производства. Работа цеха происходила в три смены и соответственно требовалось функционирование в режиме непосредственного цифрового управления (НЦУ) экструзионными агрегатами АЛ-1500 от ЭВМ. Выполнялись работы совместно с Калининским политехническим институтом (КПИ), кафедра Золотова Е.В., и совместно с Редкинским филиалом опытно-конструкторского бюро автоматики (РФ ОКБА).

Сложная ситуация возникла тогда с проблемой планирования производства посредством ЭВМ. Вначале эта задача казалось простой, ведь технологи цеха ее решали регулярно даже на калькуляторах. Но первые разработки программы на ЭВМ,

выполненные представителями РФ ОКБА, где занимались этим программисты – выпускники Московского физико-технического института (МФТИ), привели только к разработке слишком приближенного варианта метода [1]. Заводские технологи легко находили лучшее решение, чем одни из лучших специалистов в СССР на новейшем компьютере. Для планирования производства на заводе вынуждены были сами разработать оригинальный метод векторной многокритериальной оптимизации с нелинейными целевыми функциями, который позже был назван методом «надувного шарика» (МНШ) [2–6]. Он позволял находить даже лучшие решения, чем могли рассчитать опытные заводские технологи, и, естественно, намного более удачные, чем программисты из МФТИ. Серьезную помощь в нахождении нужного алгоритма решения задачи оказал заместитель заведующего кафедры Золотова Е.В. профессор Николаев А.А. Он же подсказал идею использовать «метод максимального элемента» (ММЭ) профессора Берзина Е.А. [7]. Весной 1975 г. Анатолий Алексеевич на научно-технической конференции в КПИ выступил с объединенным докладом и впервые изложил основы нового решения по планированию производства на Нелидовском заводе пластмасс.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ

Рассмотрим подробнее ситуацию с МНШ для решения задачи векторной многокритериальной оптимизации с нелинейными целевыми функциями. Переехав из г. Нелидово в г. Горький и устроившись в научно-исследовательский и проектный институт механизации и автоматизации управления производством в автомобильной промышленности (НИИУавтопром), автор данной статьи решил все-таки опубликовать описание алгоритма в серьезном научном издании [2]. В качестве рецензента выступил опытный научный работник из Горьковского государственного университета им. Н.И. Лобачевского кандидат физико-математических наук Коган Д.И. (позже профессор, доктор физико-математических наук). Он сделал ряд ценных замечаний по изложению, предложил несколько сократить публикуемый материал (в результате полностью он был опубликован лишь в 2014 г. [6]) и подтвердил, что алгоритм вполне работоспособен, но имеет ограниченное применение для частных задач. Это предопределило судьбу алгоритма на несколько десятилетий вперед, но через два десятилетия все-таки выяснилось, что это далеко не так [8].

При анализе и уточнении описания алгоритма неожиданно выяснилось, что постановка задачи оптимизации планирования производства восходит к более общей постановке задачи, описанной в книге академика Л.В. Канторовича, Нобелевского лауреата по экономике [9].

Имеется множество агрегатов (участков, предприятий) $I = \{ i : i = 1, 2, \dots, m \}$, на которых необходимо выпускать множество видов изделий $J = \{ j : j = 1, 2, \dots, n \}$ в заданном ассортименте, вектор – столбец $[b_{jo}]$. Известна матрица производительности i -го агрегата по выпуску j -го изделия $[a_{ij}]$. Пусть x_{ij} – время работы i -го агрегата по выпуску j -го изделия, а z_i – общий ресурс работы i -х агрегатов. Требуется так распределить производство изделий между предприятиями, т.е. найти матрицу $[x_{ij}^*]$, чтобы в единицу времени выпускалось максимальное количество полных ассортиментных наборов изделий μ .

Для автомобилестроения – это задача распределения заданий по выпуску комплектующих изделий по заводам (цехам, участкам) с целью максимизации выпуска автомобилей, для станкостроения – станков и т.д.

Итак, задача распределения заданий по выпуску комплектующих изделий по цехам (заводам, участкам) от Л.В. Канторовича [9] выглядит следующим образом

(в несколько уточненном виде). Требуется найти матрицу оптимального решения $[x^*_{ij}]$, максимизирующую линейную форму L при условиях:

$$L = \mu; \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^m a_{ij} x_{ij} \geq b_{j0} \mu; \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq z_i; \quad (3)$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad a_{ij} \geq 0, \quad b_{j0} > 0. \quad (4)$$

Канторович Л.В. в своей работе [9] справедливо указывает, что постановка данной задачи вписывается в постановку задачи линейного программирования и решается ее методами. При этом он указывает, что эта постановка задачи является самой массовой среди других постановок задач по оптимизации в экономике и производстве. Целый ряд других задач с развитием данной постановки он тоже рассматривал.

Однако данная постановка задачи с точки зрения практического использования имеет ряд серьезных недостатков, и дело не в тривиальности целевой функции. При такой постановке задачи обычно оказывается незагруженной часть оборудования, что для нелидовой ситуации было невозможно. А попытка обеспечить загрузку оборудования приводит, как минимум, к нелинейной правой части в уравнении (2). Кроме того, для нелидовой ситуации требовался учет переналадок при переходе агрегатов с выпуска одной номенклатуры на другую, не менее одной смены, т.е. задача уже совсем усложнялась, появлялась разрывность и требовала комбинаторных методов решения, например метода ветвей и границ (МВГ) [10].

Небольшие изменения данной постановки задачи приводят к намного более широким возможностям и новым методам ее решения. Постановку задачи можно представить совсем в ином виде [5, 6]:

$$b_{jt} \rightarrow \max; \quad (5)$$

$$L = \sum_{j=1}^n b_{jt}, \quad j=1, \dots, n, \quad (\text{вспомогательный}) \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^m a_{ij} x_{ij} \geq b_{jt}, \quad (7)$$

где

$$b_{jt} = f_j(b_{j0}, \mu, t) \geq b_{j0} \mu, \quad (8)$$

а $f_j(b_{j0}, \mu, t)$ – монотонная неубывающая функция,

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq z_i, \quad (9)$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad a_{ij} \geq 0, \quad b_{j0} > 0, \quad (10)$$

где $t = 1, 2, \dots, R$ и $b_{jt} = [b_1, b_2, \dots, b_j, \dots, b_n]^T$.

Возможный вид целевых функций $b_{jt} = f_j(b_{j0}, \mu, t)$ представлен на рис. 6. Требуется найти матрицу оптимального решения $[x^*_{ij}]$, соответствующую максимальному значению $b^P_{jt \max} = [b_{1 \max}, b_{2 \max}, \dots, b_{j \max}, \dots, b_{n \max}]^T$.

На данном примере (рис. 1) показано, что при исходной постановке задачи (1)–(4) находится решение, соответствующее точкам $b_{1\mu^*}, b_{2\mu^*}, \dots, b_{j\mu^*}, \dots, b_{n\mu^*}$. Если же имеется остаток ресурсов после нахождения μ^* (максимальное количество ассортиментных наборов, которые можно выпустить по постановке задачи в форме Л.В. Канторовича), то при постановке задач (5)–(10) МНШ может находить гораздо лучшее решение, соответствующее точкам $b_{1 \max}, b_{2 \max}, \dots, b_{j \max}, \dots, b_{n \max}$. Найдены они (для данного примера) для номеров итераций $t = 3, R-2, R-2, R-3$. Соответственно, весь поиск решения заканчивается на итерации с $t = R-3$. Базовая часть алгоритма МНШ сделала бы остановку при первом появлении границы на 3-й итерации.

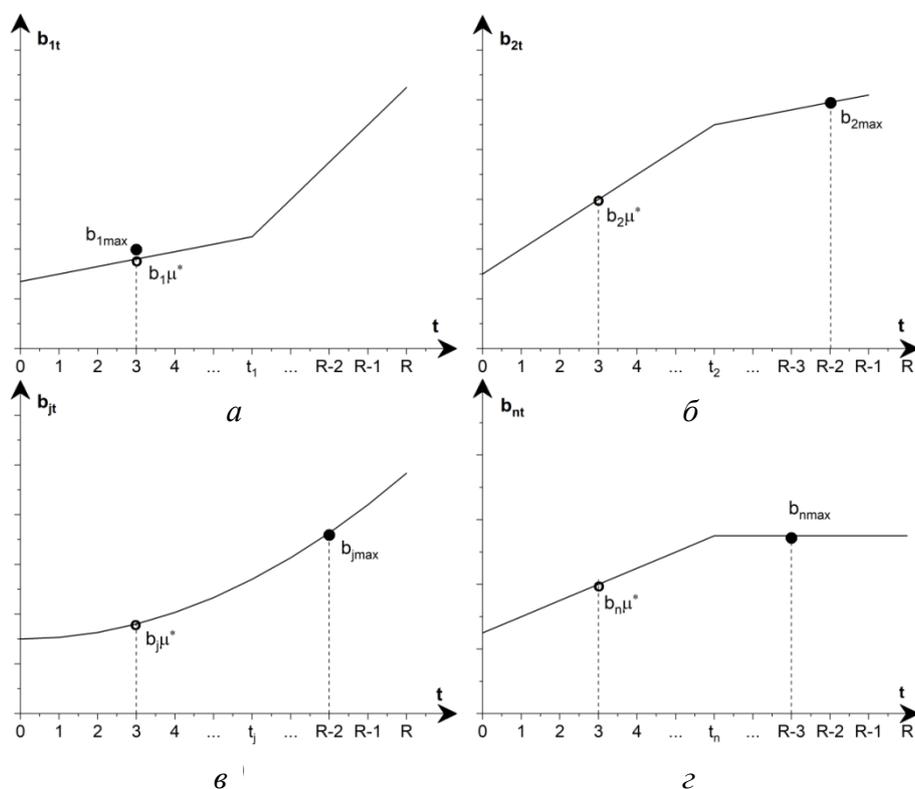


Рис. 1. Графики желаемых уровней критериев в зависимости от итоговой ситуации в виде нелинейных целевых функций

Метод «надувного шарика» [2, 5, 6] имеет вид гибридного алгоритма и включает в себя уже известные на момент 1975 г. методы:

итеративный [11], позволяющий находить оптимальное решение с точностью до ε за конечное число итераций;

максимального элемента Берзина Е.А. [7], который посоветовал использовать Николаев А.А.;

ветвей и границ [10].

Кроме того, используется дополнительно собственный специально разработанный точный метод закрепления оценок агрегатов А-, В-классов [2, 6]. Идею его использования подсказала технолог цеха, которая до этого на калькуляторе регулярно решала данную задачу.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ И ВОЗМОЖНОСТИ МНШ

МНШ позволил находить лучшее решение, чем находил опытный заводской специалист, и делать это быстрее.

В 1991 г. МНШ был успешно внедрен на швейной фабрике для решения задачи линейного раскроя ткани [3, 4]. При этом, чтобы при разрезе не допустить брака, учитывалось использование между заготовками при раскрое перемычек (припусков, зазоров и т.п.). И опять на практике оказалось, что программа считала лучше специалистов с большим опытом работы и практически мгновенно на обычных ПЭВМ советского производства того периода [3]. Но уже шел 1992 г. – экономическая ситуация в стране стала быстро ухудшаться, у швейных фабрик и других предприятий стали падать объемы производства, об оптимизации речь не шла, лишь бы выжить. И готовая программа, которую мы хотели внедрять по всей России и далее, оказалась никому не нужной. Пришлось свернуть это направление, как теперь понятно, зря.

В 2006 г. автор, проглядывая книги по направлению «искусственный интеллект» (ИИ) из своей домашней библиотеки, в очередной раз просмотрел книгу Лорьера по ИИ [12, 13]. Она была издана в 1991 г. В этот раз автор посмотрел внимательнее вторую часть книги, где описан пример с созданием интеллектуальной системы (ИС) ALICE. И неожиданно обнаружил многие знакомые формулы, чертежи, блок-схемы, фразы текста из многолетней работы над МНШ. И вдруг понял, что внутри алгоритмической структуры мощнейшей ИС ALICE находится МНШ. Конечно, разработчики ALICE самостоятельно вышли на алгоритм, похожий на МНШ, в ядре всей системы ALICE. В 2007 г. автор выступил с докладом на эту тему [8].

С 70-х годов по нулевые годы французским ученым в области ИИ Лорьером Ж.-Л. разрабатывалась и развивалась ИС ALICE [12, 14]. Дальнейшие версии развития ALICE – это системы SNARK (1986), RABBIT (1992) и MALICE (2005). После его смерти в 2005 г. эти работы продолжаются [14] его учениками и последователями. Общее у подхода Лорьера и МНШ следующее:

использование принципа «надувного шарика» для нахождения локальных и глобального максимумов;

некоторые особенности используемых методов, например использование начального решения внутри области изменения переменных, итеративного метода решения задачи, простые методы закрепления промежуточных решений для ускоренного поиска общего решения задачи, применение комбинаторных методов на некоторых этапах;

математическое описание линеаризованного представления модели в виде ограничений;

нелинейное представление используемых критериев и т.д.

Если Лорьер больше внимания уделял решению интеллектуальных задач, то использование МНШ больше нацелено на решение ряда конкретных нелинейных численных задач со специальной векторной структурой критериев в нелинейной форме.

В результате, по прошествии 30 лет работы над МНШ, выяснилось, что он принципиально позволяет создавать не только простые системы оптимизации с векторной структурой критериев, но и мощнейшие ИС, например ALICE.

После этого пришлось снова возобновить работы над реализацией и возможностями использования МНШ, хотя, казалось бы, в мире уже накоплен гигантский опыт работы специалистов в этой сфере [15–21]. Приведем пример расчета на современной версии работы программы, реализующей МНШ (рис. 2, 3).

Исходные данные

Количество агрегатов

Количество изделий

Точность (%) Логирование

Матрица производительности / Время работы агрегатов / Ассортиментный набор

Количество наборов

	1	2	3	4	5	6
1 изд	400	450	475	480	495	515
2 изд	500	600	650	750	800	850
3 изд	600	680	720	730	750	760

Рис. 2. Задание желаемого изменения ассортиментных наборов в виде вектора нелинейных монотонно неубывающих функций

Решение

	1 изд	2 изд	3 изд
Набор	455,47	800	688,75

	1 изд	2 изд	3 изд
1 агр	11,125	0	68,875
2 агр	79,9688	0	0
3 агр	0	80	0

Рис. 3. Решение оптимизационной задачи

Лучше решения не найти, ресурс полностью использован. Обратите внимание, что решение находится на разных шагах итерации.

Рассматриваемый метод – полиномиальный, он позволяет:

решать ряд нелинейно поставленных задач, включая целочисленные постановки, тем же методом;

быстрее решать поставленные задачи, причем используя диалог с пользователем для смены условий поставленной задачи;

просто использовать как математический метод в других комплексах математического и программного обеспечения, например при проектировании различных видов оборудования, комплексов и технологий, где неизбежно возникают многокритериальные проблемы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрено поэтапно развитие исследований по разработке МНШ, начиная от работ при создании Нелидовой АСУТП с участием сотрудников и выпускника КПИ, как нового метода решения ряда нелинейных многокритериальных задач. Указаны его возможности для дальнейшего развития и применения в современный период, в том числе для использования в системах ИС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алешин А.Я., Самсонов В.Г., Фаянс А.М., Федорук В.Н., Цельковский В.П. Подход к созданию АСУ ТП производства листа из полистирола // *Приборы и системы управления*. 1975. № 2. С. 1–2.
2. Бронфельд Г.Б. Алгоритм решения задачи оптимального распределения плана производства // *Труды института. Автоматизация и механизация управления производством*. Горький, НИИУавтопром, 1977, вып. 2. С. 75–83.
3. Бронфельд Г.Б., Патокин Д.В. Программа оптимального раскроя ткани на ПЭВМ типа «ИСКРА-1030М». Руководство пользователя. Н. Новгород: НПЧВП «ВЕХА», 1991. 5 с.
4. Бронфельд Г.Б. Решение задачи оптимального раскроя материалов // Сб. докладов «Первой Всероссийской научно-практической конференции по вопросам решения оптимизационных задач в промышленности ОПТИМ-2001». СПб.: ЦНИИ ТС, 2001. С. 9–12.
5. Бронфельд Г.Б. Метод «надувного шарика» для решения задач планирования производства // Сб. докладов «Первой всероссийской научно-практической конференции по вопросам решения оптимизационных задач в промышленности ОПТИМ-2001». СПб.: ЦНИИ ТС, 2001. С. 167–170.
6. Бронфельд Г.Б. Основы искусственного интеллекта: учеб. пособие. Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2014. 253 с.
7. Берзин Е.А. Оптимальное распределение ресурсов и элементы синтеза систем / ред. Е.В. Золотов. М.: Советское радио. 1974. 304 с.
8. Бронфельд Г.Б. Метод «надувного шарика» и подход Лорьера // Сб. тезисов докладов «Международной научно-технической конференции "Информационные системы и технологии ИСТ-2007"», Н. Новгород, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2007. С. 158.
9. Канторович Л.В. Экономический расчет наилучшего использования ресурсов. М.: АН СССР. 1960. 349 с.
10. Корбут А.А., Финкельштейн Ю.Ю. Дискретное программирование. М.: Наука, 1969. 370 с.
11. Итеративные методы в теории игр и программировании / под общ. ред. В.В. Беленького и В.А. Волконского. М.: Наука. 1974. 239 с.
12. Лорьер Ж.-Л. Системы искусственного интеллекта. М.: Мир, 1991. 568 с.
13. Бронфельд Г.Б. Прямое наложение знаний и его возможности. Анализ, методология, новая модель знаний, алгоритмы, возможности «невозможности». Saarbrücken, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing. 2014. 236 с.
14. En l'honneur de Jean-Louis Laurière, Paris, 2006. URL: <https://www.slideserve.com/christopher/journ-e-scientifique-en-l-honneur-de-jean-louis-lauriere-22-mars-2006-enseigner-les-travaux-de-jean-louis-lauriere> (дата обращения: 15.06.2019).
15. Штойер Р. Многокритериальная оптимизация. Теория, вычисления и приложения. М.: Радио и связь, 1992. 504 с.
16. Информационные технологии в бизнесе / под ред. М. Желены. СПб.: Питер. 2002. 1120 с.
17. Zeleny M. The Evolution of Optimality: De Novo Programming // *Evolutionary Multi-Criterion Optimization, Third International Conference, EMO 2005, Guanajuato, Mexico, March 9-11, 2005, Proceedings*. Spring, 2005. P. 1–13.
18. Соболев И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями: учебное пособие. М.: Дрофа, 2006. 175 с.
19. Микони С.В. Многокритериальный выбор на конечном множестве альтернатив: учебное пособие. СПб.: Лань. 2009. 272 с.

20. Еременко Ю.И. Интеллектуальные системы принятия решений и управления: учебное пособие. Старый Оскол: ТНТ. 2017. 404 с.

21. Зуенко А.А., Македонов Р.А. Локальный поиск при решении задач удовлетворения ограничений, представленных с помощью нечисловых матриц // Труды 16-й Национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2016. М.: РКП. 2018. Т. 1. С. 44–52.

THE METHOD OF «INFLATABLE BALL» TO SOLVE THE PROBLEM OF MULTI-CRITERIA OPTIMIZATION WITH NONLINEAR OBJECTIVE FUNCTIONS

G.B. BRONFELD, Cand. Sci.

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev 24, Minin St.,
Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: stolem1985@gmail.com

The history of origin and development of the method of «inflatable ball» (MIB), since the period of creation of the automated control system of technological process of production of sheets from thermoplastics at Nelidovsky plastics factory for a task of planning of work of a complex of units is considered. An approach to the formulation of multi-criteria optimization problems with equipment changeovers and nonlinear optimization criteria is described. The formulation of the problem goes back to the ideas of L.V. Kantorovich. Account in the formulation changeovers complicates the task. The method MIB for solving the problem is described. The MIB algorithm is based on the iterative method. In MIB included additional special method of fastening of classes, method of maximum element and a method of branches and boundaries. Some recommendations for solving a wide class of problems with the help of MIB, including the problems of «artificial intelligence» are presented.

Keywords: optimization, multi-criteria, method of «inflatable ball», method of the maximum element, branch-and-bound method, iterative method, production planning

REFERENCES

1. Aleshin A.Ya., Samsonov V.G., Fayans A.M., Fedoruk V.N., Celykovskij V.P. Approach to the creation of automated process control systems for the production of polystyrene sheets // *Pribory i sistemy upravleniya*, 1975. No 2, pp. 1–2. (In Russian).

2. Bronfel'd G.B. Algoritm resheniya zadachi optimal'nogo raspredeleniya plana proizvodstva // *Trudy instituta. Avtomatizaciya i mekhanizaciya upravleniya proizvodstvom*. Gor'kij, NIUavtoprom, 1977, No. 2, pp. 75–83. (In Russian).

3. Bronfel'd G.B., Patokin D.V. Programma optimal'nogo raskroya tkani na PEVM tipa «ISKRA-1030M». Rukovodstvo pol'zovatelya [The program of optimal cutting of fabric on PC type «SPARK-1030M». User manual]. N. Novgorod: NPCHVP «VEKHA», 1991. 5 p. (In Russian).

4. Bronfel'd G.B. Solving the problem of optimal cutting of materials // *Sb. dokl. «Pervoj vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii po voprosam resheniya optimizacionnyh zadach v promyshlennosti OPTIM-2001»*, S.-Peterburg, CNII TS 2001. P. 9–12. (In Russian).

5. Bronfel'd G.B. The method of «inflatable ball» for solving production planning problems // *Sb. dokl. «Pervoj vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii po voprosam*

resheniya optimizacionnyh zadach v promyshlennosti OPTIM-2001», S.-Peterburg, CNII TS 2001. S. 167–170. (In Russian).

6. Bronfel'd G.B. Osnovy iskusstvennogo intellekta [The Basics of artificial intelligence]: study guide. N. Novgorod: NSTU n.a. R.E. Alekseev, 2014. 253 p.

7. Berzin E.A. Optimal'noe raspredelenie resursov i ehlementy sinteza sistem [Optimal allocation of resources and elements of the system synthesis] / edited by E.V. Zolotov. Moscow: Soviet radio, 1974. 304 p.

8. Bronfel'd G.B. The method of «inflatable ball» and approach Lorier // *Sb.tezisev dokladov «Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii «Informacionnye sistemy i tekhnologii IST-2007»*», N. Novgorod, NGTU im. R.E. Alekseeva, 2007. 158 s. (In Russian).

9. Kantorovich L.V. Ekonomicheskij raschet nailuchshego ispol'zovaniya resursov [Economic calculation of the best use of resources]. Moscow: AN SSSR. 1960. 349 p.

10. Korbut A.A., Finkel'shtejn Yu.Yu. Diskretnoe programmirovaniye [Discrete programming]. Moscow: Nauka, 1969. 370 p.

11. Iterativnye metody teorii igr i programmirovaniy [Iterative methods of game theory and programming] / Pod obshch. red. V.V. Belen'kogo i V.A. Volkonskogo. Moscow: Nauka, 1974. 239 p.

12. Lor'er Zh.-L. Sistemy iskusstvennogo intellekta [Artificial intelligence systems]. Moscow: Mir, 1991. 568 p.

13. Bronfel'd G.B. Pryamoe nalozhenie znaniy i ego vozmozhnosti. Analiz, metodologiya, novaya model' znaniy, algoritmy, vozmozhnosti «nevozmozhnosti» [The technology of direct imposition of knowledge and its capabilities. Analysis, methodology, new model of knowledge, algorithms, possibilities of «impossibility»]. Saarbrucken, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing. 2014. 236 p.

14. En l'honneur de Jean-Louis Laurière, Paris, 2006. URL: <https://www.slideserve.com/christopher/journ-e-scientifique-en-l-honneur-de-jean-louis-lauriere-22-mars-2006-enseigner-les-travaux-de-jean-louis-lauriere> (data of access 15.06.2019).

15. Shtojer R. Mnogokriterial'naya optimizaciya. Teoriya, vychisleniya i prilozheniya [Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation, and Application]. Moscow: Radio i svyaz'. 1992. 504 p.

16. Informacionnye tekhnologii v biznese /pod red. M. Zheleny [The IEBM Handbook of Information Technology in Business]. S.-Peterburg: Piter. 2002. 1120 p.

17. Zeleny M. The Evolution of Optimality: De Novo Programming// Evolutionary Multi-Criterion Optimization, Third International Conference, EMO 2005, Guanajuato, Mexico, March 9-11, 2005. Proceedings. Spring. 2005, pp. 1–13.

18. Sobol' I.M., Statnikov R.B. Vybory optimal'nyh parametrov v zadachah so mnogimi kriteriyami: uchebnoe posobie [Selection of optimal parameters in problems with many criteria: textbook]. Moscow: Drofa. 2006. 175 p.

19. Mikoni S.V. Mnogokriterial'nyj vybor na konechnom mnozhestve al'ternativ: uchebnoe posobie [Multi-criteria choice on a finite set of alternatives: textbook]. S.-Peterburg: Lan', 2009. 272 p.

20. Eremenko Yu.I. Intellektual'nye sistemy prinyatiya reshenij i upravleniya: uchebnoe posobie [Intellectual systems of decision-making and management: a training manual]. Staryj Oskol: TNT. 2017. 404 p.

21. Zuenko A.A., Makedonov R.A. Local search in solving the problems of satisfying the constraints presented by non-numerical matrices // *Trudy 16-j Nacional'noj konferencii po iskusstvennomu intellektu s mezhdunarodnym uchastiem KII-2016*. Moscow: RKP. 2018. V. 1, pp. 44–52. (In Russian).

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РЫНКА ФЬЮЧЕРСОВ

Д.Б. ОРАЗГЕЛЬДЫЕВА, А.Н. ВЕТРОВ, канд. техн. наук

Тверской государственной технической университет, 170026, Тверь,
наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: vetrov_48@mail.ru

© Оразгельдыева Д.Б., Ветров А.Н., 2019

Для того чтобы спрогнозировать динамику рынка фьючерсов и в целом временных рядов нужно не только перебрать десятки методов прогнозирования, количество и вариации которых растут с каждым годом, но также оценить, какой из них будет работать точнее в данное время и в данной ситуации. В настоящей статье производится анализ методов прогнозирования динамики временных рядов на рынке фьючерсов. Предложен алгоритм оценивания, базирующийся на оценке семи наиболее употребительных показателей и подсчете баллов по каждому из методов прогнозирования, относительно каждого из критериев. Поскольку важность одного критерия может быть больше, чем другого, в алгоритме сделана корректировка относительно весовых коэффициентов. Использование предложенного алгоритма позволяет определять качество прогноза при использовании различных методов в конкретных ситуациях.

Ключевые слова: прогнозирование временных рядов, оценки, коэффициенты для оценки качества моделей, нормированный индекс детерминации, средняя процентная ошибка, стандартное отклонение, методика оценки методов прогнозирования.

ВВЕДЕНИЕ

Обесценивание денег (или, иными словами, инфляция) становится первостепенной предпосылкой к развитию и совершенствованию экономики. Наличие инфляции порождает острую необходимость повышения компетенции в вопросах грамотного распоряжения средствами для снижения инфляционных потерь. Этот проблемный момент порождает вторую потребность, а именно – выбор оптимальной инвестиционной политики незанятых денежных средств.

Эффективным способом инвестирования в производные финансовые инструменты являются фьючерсные контракты, которые отличаются своей независимостью от инфляции, при этом дают возможность преумножения капиталовложений, что делает работу предприятий стабильнее. Капитал частных инвесторов этот подход также не обходит стороной.

Эффективность данного инструмента не вызывает сомнений, и это оказывает влияние на потенциальных инвесторов, стимулируя создание (модификацию) множества методов для прогнозирования динамики временных рядов.

Основные два вопроса, которые задают себе участники рынка фьючерсов, занимающиеся инвестиционной деятельностью, это вопросы определения направления тренда и оценки времени, необходимого для совершения фьючерсной операции, чтобы осуществить ее с максимальной эффективностью (прибыльностью). Ответы на эти вопросы зависят от многих факторов как макро-, так и микроэкономического характера, наблюдающихся в текущий момент времени, а также от развития ситуации на рынке фьючерсного товара в будущем [1].

Следует отметить, что результаты инвестиций в большей степени определяются именно будущим состоянием рынка. Вот почему во всех странах финансовые аналитики уже не одно десятилетие пытаются разработать новые методы прогнозирования, позволяющие им более точно и надежно оценивать будущее развитие рынка, а следовательно, совершать более эффективные инвестиции [2].

Ежегодно наблюдается большой прирост методов прогнозирования показателей рынка, и прогнозистам необходимо ориентироваться и уметь делать выбор в предлагаемом многообразии инструментов прогнозирования. Исходя из вышеуказанной ситуации, можно определить актуальность проблемы исследования как выбор метода прогнозирования, наиболее адекватного к конкретным задачам исследования рынка фьючерсов.

Помимо научной значимости проблемы рационального выбора метода прогнозирования стоит отметить и практическую актуальность в сравнительном анализе прогностических инструментов, позволяющих сделать результаты прогнозирования наиболее точными и обоснованными.

Из вышесказанного вытекает, что проблемой исследования является динамичность рынка фьючерсов, в связи с которой столь сложно выбрать наилучший метод прогнозирования, и это становится предметом исследования. Соответственно, объектом исследования будет рынок фьючерсов.

СОПОСТАВЛЕНИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНОГО И ТЕХНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Если технический анализ сосредоточен на изучении динамики рынка, то фундаментальный анализ фокусирует внимание на экономических силах спроса и предложения, которые заставляют цену расти, снижаться или оставаться неизменной. Фундаментальный подход изучает все значимые факторы, влияющие на рыночную цену, чтобы определить действительную стоимость как реальную стоимость того или иного товара, установившуюся в результате действия закона спроса и предложения [3].

Чартисты, или аналитики графиков, считают, что не столь важны причины возникновения тренда, сколь важен итог, в то время как фундаментальные аналитики всегда склонны к тому, чтобы знать причины возникновения изменений на рынке.

Прогнозисты на рынке фьючерсов относят себя к одной из двух групп: группе фундаментальных прогнозистов или группе технических прогнозистов. Хотя в этих двух, на первый взгляд, разных подходах на самом деле есть масса общего. Так, фундаментальные аналитики знакомы с теорией графического анализа, а любым изменениям в трендах предшествует какое-либо экономическое явление, доказывая то, что чартисты, изучая графики, на самом деле изучают экономические предпосылки к данному явлению, только в сокращенной форме [4, 5].

Преимущество технического анализа обусловлено тем, что на ранних этапах выявить взаимосвязь экономического явления с изменением тренда – достаточно трудоемкая и долгая задача, в то время как изучение графика движения цен за предыдущие периоды делает анализ намного быстрее и эффективнее [6]. В данной статье упор сделан на технический анализ.

ОЦЕНКА ПРОГНОЗНЫХ МОДЕЛЕЙ

Оценку прогноза можно дать различными способами, используя всевозможные критерии качества. Стоит отметить, что не все показатели могут иметь одинаковое значение для прогнозистов, данный пункт имеет субъективное воздействие, которое

должным образом влияет на результаты исследования и в целом на прогноз. Так как данный момент несет субъективный характер, как отмечалось ранее, предлагается измерять результаты исследования в балльной оценке относительно прогнозов, т.е. считать место прогноза по показателю, учитывая при этом, что показатели могут иметь различные веса в цепи критериев.

Методу проставляется оценка от 1 до 10 в зависимости от важности критерия для прогнозиста, при этом критерии могут иметь одинаковый приоритет:

$$w_i = \frac{r_i}{\sum_{i=1}^n r_i}, \quad (1)$$

где r_i – балл для i -го критерия, w_i – вес i -го критерия.

Тогда выбор метода сводится к оценке и ранжированию, выставляя наилучшему методу по критерию балл n (количество методов), наименее выигрышному – 1.

Тогда можно легко посчитать сумму баллов, уделяя внимание весовым коэффициентам.

Оценка модели b рассчитывается по формуле

$$b = \sum_{j=1}^m h_j w_j, \quad (2)$$

где h_j – это балл, присвоенный методу по j -му критерию.

Делать выбор метода, основываясь только на одной выборке, гораздо рискованнее, чем при наличии нескольких выборок различного диапазона, т.е. также необходима проверка метода на пригодность к краткосрочному периоду, среднесрочному и долгосрочному, поэтому предлагается усреднить данные оценки, используя усредненное значение посчитанных баллов.

Средняя оценка модели рассчитывается по формуле

$$w_i = \frac{\sum_{i=1}^n b^k}{p}, \quad (3)$$

где p – количество рядов.

Методика оценки включает следующие показатели:

1. Нормированный индекс детерминации.

Коэффициент детерминации является наиболее распространенной мерой оценки качества модели. Он показывает процент объясненной моделью дисперсии.

Коэффициент детерминации, как правило, используют для оценки регрессионной модели, но его можно применять и для экстраполяционных моделей.

Для модели, которая хорошо описывает ряд данных, коэффициент детерминации стремится к единице, т.к. сумма квадратов ошибок (SSE) стремится к нулю.

Если модель представляет прямую, т.е. не описывает ряд данных, то коэффициент детерминации становится равным нулю.

Для моделей с нелинейностью коэффициент детерминации может принимать значения меньше нуля. В этом случае он не интерпретируем.

Нормированный индекс детерминации рассчитывается по формуле

$$\bar{R} = 1 - \frac{(T-1)SSE}{(T-k)TSS}, \quad (4)$$

где $SSE = \sum_{t=1}^T e_t^2$ – это сумма квадратов ошибок модели (иногда обозначается еще как RSS, SSR); TSS – сумма квадратов отклонений фактических значений от средней величины.

Ошибка модели рассчитывается по формуле

$$e_t = y_t - \hat{y}_t, \quad (5)$$

где y_t – это фактическое значение; \hat{y}_t – спрогнозированное значение.

Сумма квадратов отклонений фактических значений от средней величины рассчитывается по формуле

$$TSS = \sum_{t=1}^T (y_t - \hat{y}_t)^2. \quad (6)$$

2. Среднее отношение фактических продаж к прогнозу рассчитывается по формуле

$$A = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \frac{y_t}{\hat{y}_t}. \quad (7)$$

3. Точность прогноза.

Точность прогнозирования есть понятие прямо противоположное ошибке прогнозирования.

Высокая степень ошибки явно говорит нам о низкой точности вычислений, соответственно данное утверждение работает и в обратном порядке: при малой ошибке вычислений прогноза точность будет велика.

Можно сказать, что для вычисления ошибки прогноза в данном случае использовалась средняя абсолютная процентная ошибка, обратная точности прогнозирования. Точность прогноза определяется как итог разности, когда от единицы отнимается значение средней абсолютной процентной ошибки.

$$MAPE = \frac{100}{T} \sum_{t=1}^T \frac{y_t - \hat{y}_t}{y_t}. \quad (8)$$

4. Ширина доверительного интервала математического ожидания случайной величины.

Мало знать только прогнозное значение для отдельных показателей, довольно информативной будет оценка также доверительного интервала для прогнозного значения. Чем шире доверительный интервал, тем менее мы сможем полагаться на данную оценку, несмотря на точность некоторых отдельных прогнозных значений [7].

Ширина доверительного интервала прогнозного значения

$$\delta = t_{кр} \frac{s}{\sqrt{n}} * 2, \quad (9)$$

где $t_{кр} \frac{s}{\sqrt{n}}$ – точность оценки; n – объем выборки; \bar{x} – выборочное среднее; t – аргумент функции Лапласа, при котором $\Phi(t) = \frac{\alpha}{2}$, $\alpha = 1-p$ (где p – доверительная вероятность).

5. Максимальное значение ошибки.

Максимальное значение по выборке может показать, насколько данный метод рискован, чтобы ожидать, насколько может ошибиться метод прогнозирования, т.к. минимальное значение ошибки может довольно сильно усреднить показатель СКО, то актуально будет обращать внимание на максимальную ошибку прогноза:

$$e_{max} = \max |y_t - \hat{y}_t|. \quad (10)$$

Среднеквадратическое отклонение

$$s = \sqrt{\frac{1}{T} * \sum_{t=1}^T (y_t - \hat{y}_t)^2}, \quad (11)$$

где \hat{y}_t и y_t – предсказанное и фактическое (реализованное) изменения переменной соответственно.

6. Ширина доверительного интервала СКО

$$s * \sqrt{\frac{t-1}{\chi^2_{1-\frac{\alpha}{2}, df}}} - s * \sqrt{\frac{t-1}{\chi^2_{\frac{\alpha}{2}, df}}}, \quad (12)$$

где s – выборочное среднеквадратичное отклонение; χ^2 – распределение случайной величины, $\alpha = 1-p$ (где p – доверительная вероятность), определяется по таблице Стьюдента; df – число степеней свободы.

7. Коэффициент несоответствия Тейла.

Этот метод оценки базируется на коэффициенте несоответствия, который был предложен одним из исследователей проблем экономического прогнозирования Г. Тейлом в качестве меры качества прогнозов. Числителем коэффициента расхождения (или коэффициента несоответствия) является среднеквадратическая ошибка прогноза, а знаменатель равен квадратному корню из среднего квадрата реализации [7]:

$$КН_1 = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T (\hat{y}_t - y_t)^2}{\sum_{t=1}^T y_t^2}}, \quad (13)$$

где \hat{y}_t и y_t – соответственно предсказанное и фактическое (реализованное) изменения переменной.

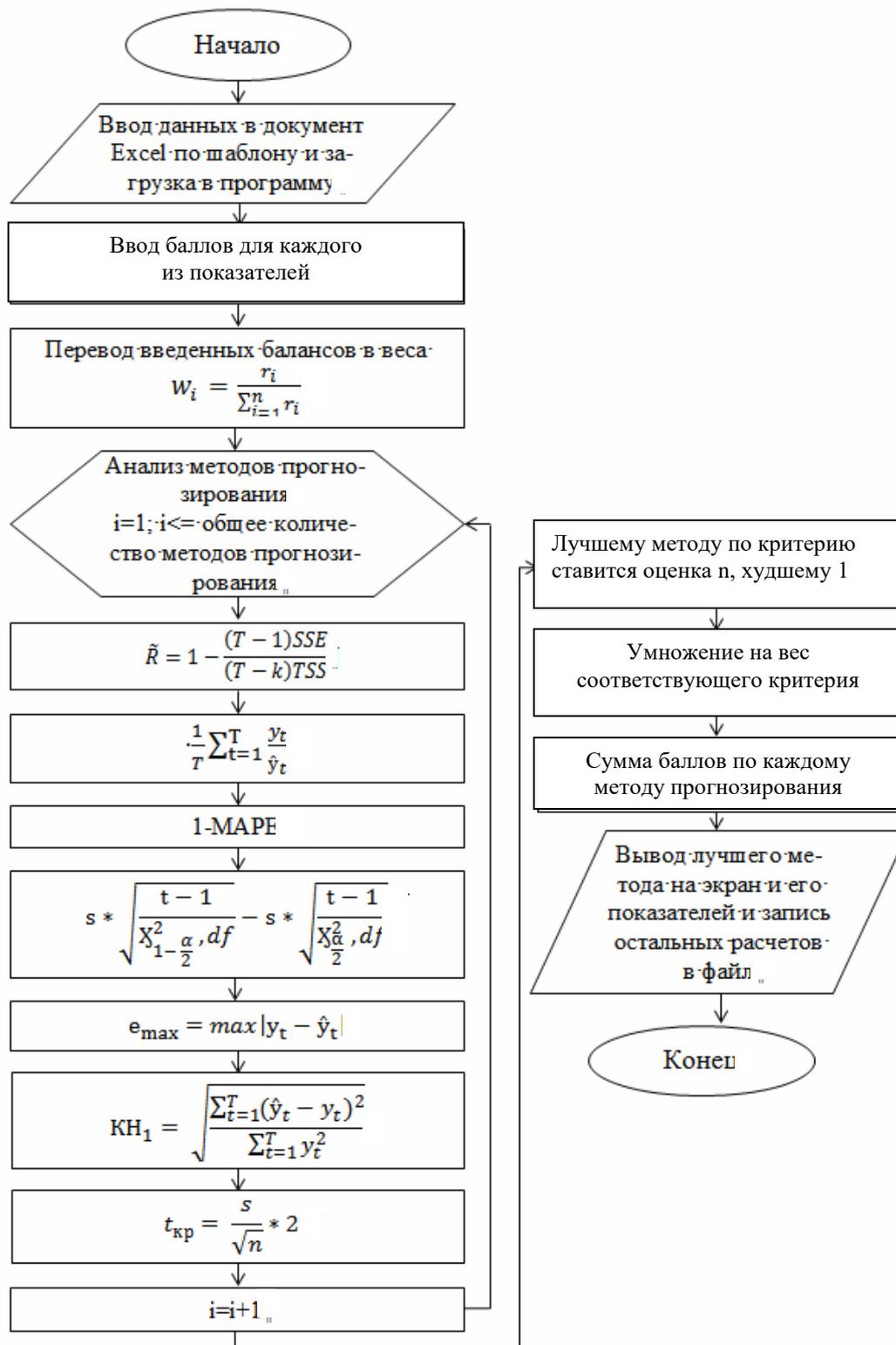
Коэффициент $КН_1 = 0$, когда все $y_t = \hat{y}_t$ (случай совершенного прогнозирования); $КН_1 = 1$, когда процесс прогнозирования приводит к той же среднеквадратической ошибке, что и экстраполяция неизменности приростов; наконец, $КН_1 > 1$, когда прогноз дает худшие результаты, чем предположение о неизменности исследуемого явления.

Верхней границы коэффициент не имеет.

Коэффициент расхождения может быть использован при сопоставлении качества прогнозов, получаемых на основе различных методов и моделей. В этом его несомненное достоинство. К тому же он имеет весьма прозрачный смысл [7].

Величина v поддается разложению на составляющие (частные коэффициенты расхождения), характеризующие влияние ряда факторов.

Данный процесс анализа можно отобразить в виде блок-схемы (рисунок).



Алгоритм работы методики по оценке методов прогнозирования

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение хотелось бы отметить, что для сравнения методов и их вариаций существует множество критериев и видов ошибок, в рамках данной работы выделены подход к сравнению методов прогнозирования, наиболее суще-

ственные статистические характеристики, по мнению автора, по определению качества прогноза и его точности. Основываясь на данных характеристиках и в целом на методе, можно определить качество прогнозов различных методов, базирующихся на анализе данных за предыдущие периоды, так как, по мнению автора, данный тип методов прогнозирования более эффективный и быстродейственный.

Также стоит отметить, что нельзя конкретно определить наилучший метод, т.к. разные методы показывают себя по-разному в зависимости от выборок и имеют свои плюсы и минусы. Поэтому актуальной темой в прогнозировании временных рядов становится комбинирование прогнозов с целью взаимоисключения недостатков моделей.

В дальнейшем для увеличения качества прогнозирования можно воспользоваться экспертными оценками в сочетании с классическими методами прогнозирования, данный подход будет дополнять, а именно корректировать методы, основываясь на авторитетном мнении экспертов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Прогнозное обоснование инвестиционных решений на финансовых рынках / Давнис В.В., Зироян М.А., Комарова Е.В. [и др.]. М.: РУСАЙНС. 2015. 218 с.
2. Евстратчик С.В. Сравнительный анализ экономико-математических методов прогнозирования динамики показателей рынка ценных бумаг. Дисс... канд. эконом. наук. Санкт-Петербург. 2005. 266 с.
3. Джон Дж. Мэрфи. Технический анализ финансовых рынков. Полный справочник по методам и практике трейдинга. М.: Вильямс. 2016. 496 с.
4. Джон К. Халл. Опционы, фьючерсы и другие производные финансовые инструменты. М.: Вильямс. 2018. 1072 с.
5. Ширяев В. Финансовые рынки. Стохастические модели, опционы, форварды, фьючерсы: учебное пособие. М.: Ленанд. 2016. 224 с.
6. Евстратчик С.В. Сравнение эконометрических и экспертных прогнозов динамики финансовых показателей // *Вестник Санкт-Петербургского университета*. 2011. № 1. С. 130–139.
7. Тэйл Г. Экономические прогнозы и принятие решений. М.: Статистика, 1977. 488 с.

ALGORITHM OF ESTIMATION AND ANALYSIS OF METHODS FOR FORECASTING THE DYNAMICS OF INDICATORS OF THE FUTURES MARKET

D.B. ORAZGELDYEVA, A.N. VETROV, Cand. Sci.

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: vetrov_48@mail.ru

To predict the dynamics of the futures market and in general time series, it is necessary not only to sort through dozens of methods of forecasting, the number and variations of which grow every year, and also to assess which of them will work more accurately at a given time and in this situation. In this article, we consider the analysis of methods for predicting the dynamics of time series in the futures market. An estimation algorithm based on the estimation of 7 indicators and scoring for each of the prediction

ISSN 2658-5030. *Вестник Тверского государственного технического университета*.
Серия «Технические науки». № 4 (4), 2019

methods with respect to each of the criteria is proposed. Proceeding from the fact that for a forecaster, the importance of one criterion can be greater than for another, so the method makes an adjustment with respect to weight coefficients.

Keywords: time series forecasting, estimations, coefficients for estimating the quality of models, normalized determination index, average percentage error, standard deviation, methodology for estimating forecasting methods

REFERENCES

1. Economic projections and decision-making. [Ekonomicheskie prognozy i prinyatie reshenij]: monograph / Davnis V.V. Ziroyan M.A., Komarova E.V. [et. al.]. Moscow: RUSAJNS. 2015. 218 p.
2. Evstratchik S.V. Comparative analysis of economic and mathematical methods of forecasting the dynamics of securities market indicators. Cand. Diss. (Economy). St. Petersburg. 2005. 266 p. (In Russian).
3. John J. Murphy. Tekhnicheskij analiz finansovyh rynkov. Polnyj spravochnik po metodam i praktike trejdinga. [Technical analysis of financial markets. Full Guide to Trading Methods and Practices]. Moscow: Vil'yams. 2016. 496 p.
4. John K. Hull. Options, futures and other derivatives. [Opciony, f'yuchersy i drugie proizvodnye finansovye instrument]. Moscow: Vil'yams, 2018. 1072 p.
5. Shiryayev V. Financial markets. Stochastic models, options, forwards, futures. Tutorial. [Finansovye rynki. Stokhasticheskie modeli, opciony, forvardy, f'yuchersy. Uchebnoe posobie] Moscow: Lenand, 2016. 224 p.
6. Evstratchik S.V. Comparison of econometric and expert forecasts of financial performance // *Vestnik Sankt-Peterburskogo universiteta*. 2011. No. 1. pp. 130–139. (In Russian).
7. Tejl G. Economic projections and decision-making. [Prognoznnoe obosnovanie investicionnyh reshenij na finansovyh rynkah]. Moscow: Statistika, 1977. 488 p.

СТРУКТУРА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОБОРОТНЫМ КАПИТАЛОМ ХОЗЯЙСТВУЮЩЕГО СУБЪЕКТА

А.Н. ВЕТРОВ, канд. техн. наук, Ю.Г. КОЗЛОВА

Тверской государственной технической университет, 170026, Тверь,
наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: jul_kozl@mail.ru

© Ветров А.Н., Козлова Ю.Г., 2019

В статье предложена структура информационной системы управления оборотным капиталом предприятия, которая может быть легко автоматизирована с использованием различных программных средств. Предложен вариант трехкомпонентного состава системы, включающий базы данных (БД), клиентское приложение и библиотеку Matlab. Одним из этапов управления оборотным капиталом является расчет его оптимальной плановой величины на следующий период с учетом его текущего положения и рыночных показателей. В статье представлена математическая модель расчета оптимальной величины оборотного капитала, являющаяся развитием модели, предложенной в диссертации Безухова Д.А. Применение предложенной в статье структуры управления в автоматизированной системе управления оборотным капиталом позволит более эффективно использовать оборотный капитал предприятия. Внедрение подобной автоматизированной системы в будущем позволит значительно сократить расходы на управленческий и линейный персонал, повысить рентабельность производства, повысить инвестиционную привлекательность организации.

Ключевые слова: управление оборотным капиталом, оценки параметров модели, экономическая добавленная стоимость, задача линейного программирования, информационная система, автоматизация систем управления.

ВВЕДЕНИЕ

Непрерывность и ритмичность производства и обращения обеспечивает правильная политика управления оборотным капиталом. Оборотный капитал также играет огромную роль в операционной деятельности предприятия. Оборотный капитал оказывает сильное влияние на уровень платежеспособности, ликвидности и рентабельности предприятия.

Проблематика управления оборотным капиталом предпринимательской организации, функционирующей в условиях рыночной экономики, широко представлена в трудах зарубежных авторов – Ю. Бриггема, З. Боди, Дж.М. Ваховича, Р. Мертона, Дж. О’Брайена, Р. Фицджеральда, Дж.К. ВанХорна, Ли Ченга Ф. и других, а также отечественных – И. Балабанова, М. Баканова, И. Бланка, В. Бочарова, О. Веретенникова, А. Казака, В. Ковалева, Д. Молякова, Е. Негашева, Г. Поляка, М. Родионовой, Г. Савицкой, Е. Стояновой, А. Шеремета и др. [1].

Существует множество западных моделей управления оборотным капиталом, но их использование зачастую неприемлемо в российской практике или возможно после существенной доработки моделей. Это обусловлено разницей в законодательной базе, плохой сопоставимостью форм бухгалтерской отчетности и другими российскими особенностями [2, 3].

В силу того, что модель управления оборотным капиталом включает в себя множество внешних факторов и ограничений производственного, рыночного, технического характера, ее эффективная реализация должна базироваться на экономико-математических и компьютерных моделях. Разрабатываемая на основе предлагаемой структуры информационная система должна базироваться на актуальном и адекватном понятии оборотного капитала, учитывать его особенности, функционал, определять эффективность его использования, рассчитывать его величину и выбирать структуру с учетом не только внутренних показателей предприятия и анализа рынка, но и принимаемой предприятием стратегии дальнейшего развития. Необходимость разработки такой структуры обуславливает актуальность тематики исследования.

Объектом исследования выступает система управления оборотным капиталом хозяйствующего субъекта.

Предмет исследования – экономико-математические модели и методы управления оборотным капиталом производственной сферы предприятия.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОБОРОТНЫМ КАПИТАЛОМ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СФЕРЫ ПРЕДПРИЯТИЯ

Оборотный капитал обеспечивает трансформацию текущих активов и пассивов предприятия в процессе производственного цикла из денежной формы в материальную и обратно. Таким образом, в системе управления оборотным капиталом объектом управления являются текущие активы и пассивы. Для того чтобы использовать оборотный капитал эффективно, необходимо управлять материальными и денежными потоками предприятия.

Систему управления оборотным капиталом можно представить в классическом для системного анализа виде (рис. 1) как взаимодействие субъекта и объекта управления. Объектом управления будет являться сам оборотный капитал, субъектом – управляющая подсистема, включающая в себя собственников и менеджеров предприятия.

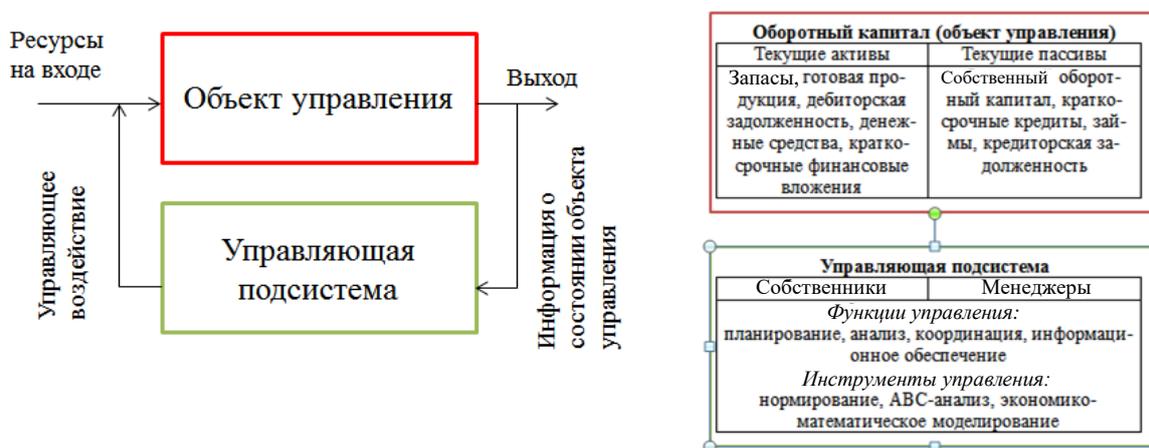


Рис. 1. Система управления оборотным капиталом производственной сферы

На этапе анализа выявляется, насколько эффективно использовался оборотный капитал в данном периоде, рассчитывается оптимальная его величина на будущий период, что позволяет получить оценки финансового состояния предприятия на будущие периоды, а значит формировать и вырабатывать меры по улучшению финансового состояния.

Существуют разные стратегии для управления оборотным капиталом. Обзор литературы по данному вопросу показал, что большинство авторов выделяют три основные стратегии: консервативную, умеренную и агрессивную [4].

Консервативная стратегия направлена на рост оборотных активов в суммарных активах предприятия, это повышает общий уровень ликвидности активов предприятия. Обратной стороной этой стратегии является снижающийся уровень оборачиваемости и рентабельности активов.

При использовании умеренной стратегии полностью удовлетворяется потребность во всех видах оборотных материальных активов. Долгосрочная кредиторская задолженность и собственный капитал предприятия формируют постоянные оборотные активы. Переменная часть оборотных активов образуется из краткосрочных обязательств.

Сохранение низкого уровня оборотных средств характерно в рамках агрессивной стратегии. Ее можно применять при стабильности поступлений и платежей в случаях, когда предприятию необходимо поддерживать жесткую экономию. Если же стратегия применяется, когда платежи нестабильны, то предприятие может потерять свою ликвидность.

Для того чтобы выбрать оптимальный вариант развития предприятия на кратко- и среднесрочную перспективу, необходимо использовать экономико-математическое моделирование для поиска оптимальных величины и структуры производственного капитала и его элементов.

КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ОБОРОТНЫМ КАПИТАЛОМ

Капитал имеет оптимальную структуру при соблюдении следующих условий: финансовый риск минимален, стоимость капитала минимальна, доходность капитала максимальна.

Следует отметить, что в настоящее время существуют различные критерии оценки эффективности оборотного капитала. Чаще всего говорят о показателях рентабельности и оборачиваемости. В то же время использование именно этих показателей как основных критериев оптимальности для управления оборотным капиталом имеет ряд существенных недостатков.

Применение показателя рентабельности в качестве показателя оптимальности для управления оборотным капиталом нецелесообразно по причине «эффекта структуры», ограниченной функциональности (не отслеживает влияния факторов объема и структуры оборотного капитала на результаты рыночной деятельности предприятия). Это связано с тем, что прибыль зависит не только от вложенного капитала, но и от затрат на него [1].

Существуют альтернативные критерии оптимальности, среди которых, по нашему мнению, наиболее заслуживает внимания показатель EVA (экономическая добавленная стоимость). Этот показатель, благодаря входящим в его состав другим показателям, разностороннее отражает деятельность по управлению оборотным капиталом.

Важным недостатком классической формулы расчета EVA является сложность расчетов в российских условиях. В связи с этим предлагается взять за основу уточненный для расчетов показатель экономической добавленной стоимости, адаптированный к российским условиям, приведенный в [1]:

$$E_w = r_D(1 - \tau \max\{k/r_E, 1\})D/V + r_E E/V, \quad (1)$$

где r_D – цена заемного капитала; τ – ставка налога на прибыль; k – ставка, в пределах которой проценты по займу вычитаются из налогооблагаемой базы; r_E – цена собственного капитала; D/V – доля заемного капитала в оборотном капитале; E/V – доля собственного капитала в оборотном капитале.

Рассуждения выше показывают целесообразность использования экономической добавленной стоимости для оценки эффективности оборотного капитала.

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ ВАРИАНТОВ ОБЪЕМА И СТРУКТУРЫ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО КАПИТАЛА

На сегодняшний день, несмотря на то, что опубликовано множество работ, посвященных управлению финансами предприятия, управлению производственной деятельностью, не предложено четкой и более-менее универсальной модели управления оборотным капиталом.

Основываясь на динамической модели типа «затраты – выпуск», приведенной в диссертации Безухова Д.А., рассмотрим возможный подход к расчету и определению структуры оборотного капитала.

Согласно модели Безухова Д.А., определение величины и структуры производственного капитала для периода планирования t совместно с выбором оптимального по указанному критерию варианта производственной деятельности с учетом прогнозируемых изменений параметров внешних рынков, производственно-технологических и финансово-ресурсных условий и ограничений этой деятельности, а также допустимого риска структуры капитала может быть представлено в виде модели [1]:

$$EVA_t = (1 - \tau) \left[\sum_{i=1}^I (p_i^{(t)} - c_i^{(t)}) y_i^{(t)} - F^{(t)} - \rho^{(t)} K^{(t)} \right] - r_E^{(t)} \gamma^{(t)} RK^{(t-1)} \rightarrow \max;$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^I \tau_{i,h} y_i^{(t)} \leq m_h^{(t)} (h = \overline{1, H}); \\ \sum_{i=1}^I c_i^{(t)} y_i^{(t)} + F_t \leq \frac{1}{1 + \alpha_t} (\gamma_i RK_{t-1}^1 + K_t - R_t); \\ K_t \leq \min \left\{ \frac{1 - \hat{K}_A^{(t)}}{\hat{K}_A^{(t)}} RK_{t-1}^1; S_t \right\}; \\ y_t \in [\hat{y}_t; D_i^{(t)}], \end{cases}$$

где τ – ставка налога на прибыль, %; $p_i^{(t)}$ – плановая цена реализации i -й единицы продукции; $c_i^{(t)}$ – плановая цена реализации i -й единицы продукции; $y_i^{(t)}$ – объем выпуска i -й единицы продукции; F_t – постоянные затраты периода; $\rho^{(t)}$ – плановая цена реализации i -й единицы продукции; $K^{(t)}$ – объем краткосрочного кредита; $r_E^{(t)}$ – цена обыкновенных акций; $\gamma^{(t)}$ – норма собственного финансирования; $RK^{(t-1)}$ – величина производственного капитала в конце периода $t - 1$; $\tau_{i,h}$ – время производства продукции i -го наименования на оборудовании h -й группы; $m_h^{(t)}$ – время работы оборудования h -й группы; α_t – доля косвенных затрат; $\gamma^{(t)}$ – норма собственного финансирования; $R^{(t)}$ – резервный фонд; $\hat{K}_A^{(t)}$ – предельное (пороговое) для периода t значение коэффициента автономии (регулируемый параметр модели); S_t – максимально

доступный для предприятия-заемщика в периоде объем краткосрочных кредитов t ; $D_i^{(t)}$ – величина рыночного спроса на продукцию i -го вида.

Исходная модель, приведенная в диссертации Безухова Д.А., является по своей сути задачей линейного программирования, приведем ее к классическому виду.

Переменными в модели являются объем выпуска продукции и размер производственного капитала. Обозначим соответственно выпуск продукции как вектор столбец X :

$$X = \begin{bmatrix} y_1 \\ \dots \\ y_I \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Объем производственного капитала обозначим как Z .

В качестве целевой функции у нас выступает показатель экономической добавленной стоимости EVA.

Приведем его к классическому виду целевой функции:

$$(1-\tau) \sum_{i=1}^I (p_i^{(t)} - c_i^{(t)}) y_i^{(t)} - \underset{E}{\gamma^{(t)} RK^{(t-1)} (1-\tau) - F^{(t)} - \rho^{(t)} K^{(t)}} \longrightarrow \max.$$

Заполним матрицу C -коэффициентов целевой функции:

$$C = \left[(1-\tau)(p_1^{(t)} - c_1^{(t)}) \quad \dots \quad -r_E^{(t)} \gamma_t \quad -(1-\tau)(F + \rho_t K_t) \right].$$

Получим целевую функцию

$$F(x)_t = \sum_{i=1}^I C_i x_i^{(t)} + C_{I+1} Z + C_{I+2} \rightarrow \max. \quad (3)$$

Рассмотрим ограничение, отражающее производственно-технологический потенциал предприятия [1]:

$$\sum_{i=1}^I \tau_{i,h}^{(t)} y_i^{(t)} \leq m_h^{(t)} (h = \overline{1, H}). \quad (4)$$

Представим его в классическом виде, записав коэффициенты при неизвестных в матрицу A , свободный член – в матрицу B .

Следует отметить, что ограничение не содержит производственный капитал, поэтому коэффициенту при производственном капитале соответствует 0 в матрице A . Рассмотрим первое неравенство системы, отражающее финансово-ресурсные ограничения предприятия [1]:

$$\sum_{i=1}^I c_i^{(t)} y_i^{(t)} + F^{(t)} \leq \frac{1}{1+\alpha_t} (\gamma_t RK_{t-1}^1 + K^{(t)} - R^{(t)}). \quad (5)$$

Приведем его к классическому виду, перебросив все переменные в левую часть, а свободные члены в правую:

$$\sum_{i=1}^I c_i^{(t)} y_i^{(t)} + \gamma_i R K_{t-1}^1 \leq \frac{1}{1 + \alpha_t} (+K^{(t)} - R^{(t)}) - F^{(t)}.$$

Коэффициенты из левой части перенесем в матрицу A , из правой – в B . Рыночные ограничения, представленные в [1], имеют вид

$$K^{(t)} \leq \min \left\{ \frac{1 - \hat{K}_A^{(t)}}{\hat{K}_A^{(t)}} R K_{t-1}^1; S_t \right\} c.$$

Представим в виде

$$\frac{1 - \hat{K}_A^{(t)}}{\hat{K}_A^{(t)}} R K_{t-1}^1 \geq K^{(t)}. \quad (6)$$

Коэффициенты из левой части перенесем в матрицу A , из правой – в B . Ограничение на объем продукции запишем в матрицу H, HI . В итоге получим матрицы коэффициентов:

$$C = \left[(1 - \tau)(p_1^{(t)} - c_1^{(t)}) \quad \dots \quad -r_E^{(t)} \gamma_t \quad -(1 - \tau)(F + \rho_t K_t) \right]; \quad (7)$$

$$A = \begin{bmatrix} \tau_{1,h}^{(t)} & \dots & \tau_{I,h}^{(t)} & 0 \\ c_1^{(t)} & \dots & c_I^{(t)} & -\frac{1}{1 + \alpha_t} \\ 0 & \dots & 0 & \frac{1 - \hat{K}_A^{(t)}}{\hat{K}_A^{(t)}} \\ 1 & \dots & 1 & 0 \\ 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

В итоге получим матрицы свободных членов:

$$B = \begin{bmatrix} m_h^{(t)} \\ \frac{1}{1 + \alpha_t} (K_t - R_t) - F \\ K^{(t)} \end{bmatrix}; \quad (9)$$

$$Z = \begin{bmatrix} D_1^{(t)} \\ \dots \\ D_I^{(t)} \end{bmatrix} \quad Z1 = \begin{bmatrix} \hat{y}_1^{(t)} \\ \dots \\ \hat{y}_I^{(t)} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

В итоге получим матрицу неизвестных

$$X = \begin{bmatrix} y_1 \\ \dots \\ y_I \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Модель будет иметь вид

$$F(x)_t = \sum_{i=1}^I C_i x_i^{(t)} + C_{I+1}^t Z + C_{I+2}^{(t)} \rightarrow \max ;$$

$$\begin{cases} a_{11} x_1 + \dots + a_{1I+1} x_{I+1} \leq b_1 ; \\ a_{21} x_1 + \dots + a_{2I+1} x_{I+1} \leq b_2 ; \\ a_{31} x_1 + \dots + a_{3I+1} x_{I+1} \geq b_3 ; \\ x_1 \leq Z_1^{(t)}, \dots, x_I \leq Z_I^{(t)} ; \\ x_1 \geq Z1_1^{(t)}, \dots, x_I \geq Z1_I^{(t)}. \end{cases} \quad (12)$$

АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОБОРОТНЫМ КАПИТАЛОМ ПРЕДПРИЯТИЯ

Структура управления оборотным капиталом предприятия с учетом расчета по модели может быть представлена в виде схемы (рис. 2).

Предложенная система управления оборотным капиталом предприятия может быть легко автоматизирована. Управление оборотным капиталом основывается на результатах анализа деятельности предприятия за предыдущий период и мониторинга рыночной ситуации. Кроме того, на плановую величину оборотного влияет выбранная стратегия развития организации, которая может быть определена путем анализа ключевых рыночных показателей, таких как доля на рынке, динамика продаж, емкость рынка и т.п.

Предложенная структура может быть реализована с использованием различных программных средств. Следует отметить, что для удобства расчетов по представленной модели управления оборотным капиталом, сводящейся к модели линейного программирования, удобно использовать Optimization Toolbox пакета Matlab. Данное средство обладает ограниченными возможностями визуального построения интерфейса и работы с БД. Поэтому как средство разработки клиентского приложения возможно использование Visual Studio C#, позволяющего легко создавать клиентский интерфейс и имеющего богатые средства работы с БД.

Для связи Microsoft Visual C# и Matlab можно использовать MATLAB Component Runtime (компилятор Matlab). Компилятор MATLAB преобразует процедуры MATLAB в приложения и библиотеки. Они могут быть использованы независимо от системы MATLAB, встраиваясь как кирпичики в разработанные с помощью других программных сред проекты. Компилятор позволяет компилировать как m-файлы и MEX-файлы, так и другие коды MATLAB. После компиляции другое приложение может использовать как объекты, так и частные функции и методы Matlab. Одной из функций компилятора MATLAB является создание библиотек для .Net [5].



Рис. 2. Структура управления оборотным капиталом предприятия

Созданная библиотека легко подключается к любому из проектов Visual Studio C#.

Схема взаимодействия компонентов системы приведена на рис. 3. БД исходных данных для расчета формируется в ходе производственной деятельности и представляет собой необходимые для расчета данные, складывающиеся как внутри предприятия, так и в результате анализа его внешнего окружения.

При запуске клиентского приложения осуществляется загрузка исходных данных из БД.

На следующем этапе ЛПР устанавливает параметры модели.

При запуске расчета по модели через Matlab Component Runtime осуществляется вызов Optimization Toolbox системы Matlab. С помощью Optimization Toolbox производится расчет по модели, определяется величина и структура оборотного капитала на следующий расчетный период. Вывод результатов расчетов осуществляется в виде отчета, генерируемого клиентским приложением.

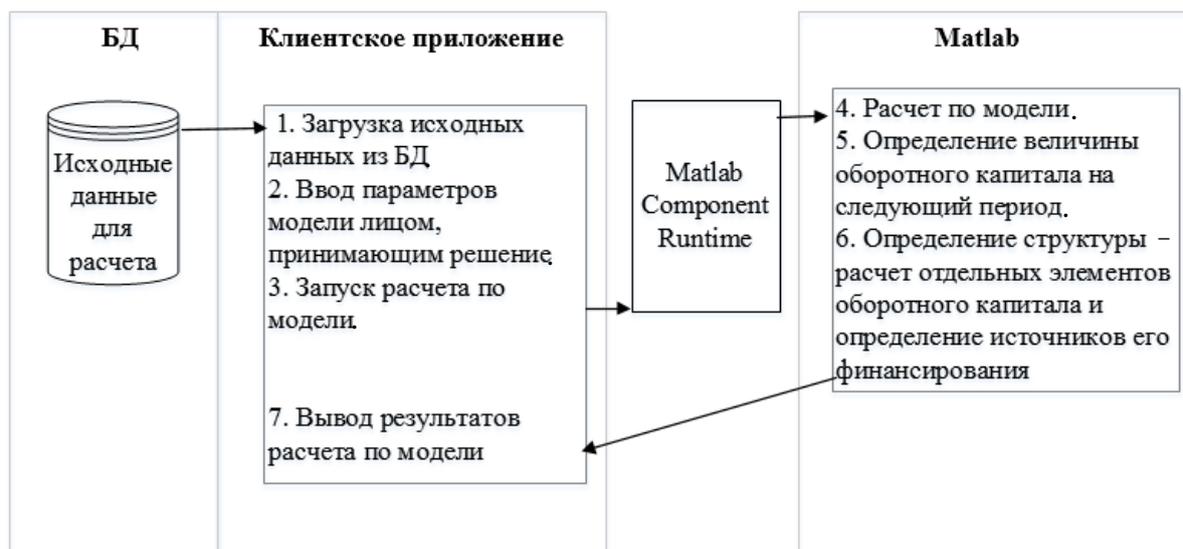


Рис. 3. Схема взаимодействия компонентов информационной системы управления оборотным капиталом

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная в статье структура управления оборотным капиталом предприятия позволяет формировать структуру оборотного капитала предприятия не только по внутренним финансовым показателям, но и учитывая рыночное окружение, а также стратегию развития, принятую предприятием на следующий период.

Следует отметить, что предложенная структура может быть автоматизирована с использованием любых программных средств. Авторами предлагается трехкомпонентная система, включающая в себя БД, клиентское приложение и Optimization Toolbox системы Matlab.

Использование предложенной в статье структуры управления в автоматизированной системе управления оборотным капиталом позволяет более эффективно использовать оборотный капитал предприятия, повышает рентабельность производства и инвестиционную привлекательность организации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Безухов Д.А. Модели и методы оптимального управления оборотным капиталом производственной сферы предприятия в условиях нестабильных рынков. Дисс... канд. экон. наук. Москва. 2015. 186 с.
2. Лаптев С.В., Шуклов Л.В. Закономерности формирования российской модели финансового менеджмента // *Управление корпоративными финансами*. 2004. № 6. С. 2–12.
3. Липчиу Н.В., Юрченко А.А. Модели управления оборотным капиталом организаций в современных условиях // *Научный журнал КубГАУ*. 2012. № 76. С. 1038–1050.
4. Бескоровайная Н.Н. Стратегия управления оборотным капиталом предприятия // *Форум. Серия: гуманитарные и экономические науки*. 2015. № 3 (6). С. 171–175.
5. Смоленцев Н.К. Создание Windows-приложений с использованием математических процедур MATLAB. М.: ДМК-пресс. 2008. 456 с.

STRUCTURE OF OPERATING CAPITAL MANAGEMENT INFORMATION SYSTEM OF ECONOMIC ENTITY

A.N. VETROV, Cand. Sci., Yu.G. KOZLOVA

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: jul_kozl@mail.ru,

The article proposes the structure of the information system of working capital management of the enterprise, which can be easily automated using various software tools. Disclosed is a variant of a three-component system composition, which includes a database, a client application and a Matlab library. One of the stages of working capital management is calculation of its optimal planned value for the next period taking into account its current situation and market indicators. The article presents a mathematical model for calculating the optimal value of working capital, which is a development of the model proposed in Besukhov's thesis D.A. The use proposed in the article of the management structure in the automated working capital management system will allow to use the working capital of the enterprise more effectively. The introduction of such an automated system in the future will significantly reduce the costs of management and line personnel, increase the profitability of production, increase the investment attractiveness of the organization.

Keywords: working capital management, model parameter estimates, economic value added, linear programming task, information system, automation of control systems.

REFERENCES

1. Bezuhov D.A. Comparative analysis of economic and mathematical methods of forecasting the dynamics of securities market indicators. Cand. Diss. (Economy). St. Petersburg. 2005. 266 p. (In Russian).
2. Laptev S.V., Shuklov L.V. Patterns of formation of the Russian financial management model // *Upravlenie korporativnymi finansami*. 2004. No 6, pp. 2–12. (In Russian).
3. Lipchiu N.V., Yurchenko A.A. Models of management of working capital of organizations in modern conditions // *Nauchnyj zhurnal KubGAU*. 2012. No 76, pp. 1038–1050. (In Russian).
4. Beskorovajnaya N.N. Enterprise working capital management strategy // *Forum. Seriya: gumanitarnye i ekonomicheskie nauki*. 2015. No3(6), pp. 171–175. (In Russian).
5. Smolencev N.K. Creating Windows Applications Using MATLAB Mathematical Procedures [Sozдание Windows-prilozhenij s ispol'zovaniem matematicheskikh procedur MATLAB]. Moscow: DMK-press. 2008. 456 p.

**ВЕСТНИК
ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Серия «Технические науки»

**Научный рецензируемый журнал
№ 4 (4), 2019**

Редактор А.Ю. Соколова
Корректор С.В. Борисов
Технический редактор Ю.Ф. Воробьева

Подписано в печать 02.12.2019

Дата выхода в свет 30.12.2019

Формат 60 x 84/8

Свободная цена

Бумага писчая

Физ. печ. л. 13,5

Усл. печ. л. 12,56

Уч.-изд. л. 6,12

Тираж 500 экз.

Заказ № 332

С – 108

Редакционно-издательский центр
Тверского государственного технического университета

Адрес издателя

170026, г. Тверь, наб. Афанасия Никитина, д. 22

Отпечатано в ООО «Наукоемкие технологии»

Центр инженерной печати

170024, г. Тверь, ул. Академическая, д. 14