

# ВЕСТНИК

*Белорусско-Российского университета*

*Научно-методический журнал  
Издается с октября 2001 г.*

*Периодичность – 4 раза в год*

1(62) 2019

---

## СОДЕРЖАНИЕ

### МАШИНОСТРОЕНИЕ

<b>ВОЕВИДКО И. В., КОЧКОДАН Я. М., ВАСЬКО А. И.</b> Разработка методики определения бурового индекса анизотропии и оценка его влияния на пространственное ориентирование скважин .....	5
<b>ГРОМЫКО П. Н., ХАТЕТОВСКИЙ С. Н., ЮРКОВА В. Л.</b> Использование удлиненной эпициклоиды для формообразования зубчатых поверхностей передач эксцентрикового типа .....	14
<b>ЛЕСКОВЕЦ И. В., СЁМЧЕН В. И., НАУМЕНКО А. Е.</b> Расчет параметров механизма подъема электротали .....	22
<b>ПАШКЕВИЧ В. М.</b> Обучаемые функциональные семантические сети для моделирования технических объектов .....	31
<b>СВИРЕПА Д. М., СЕМЁНОВА А. С., СУХОЦКИЙ С. А.</b> Конструкции инструментов для совмещенной обработки резанием и поверхностным пластическим деформированием магнитно-динамическими раскатниками.....	38
<b>СОТНИК Л. Л., РУСАН С. И., СИВАЧЕНКО Л. А.</b> Исследования взаимодействия материальной точки с цилиндрическим эксцентриком .....	48
<b>ТАРАСИК В. П.</b> О терминологии в области автотракторостроения.....	55

**ТАРАСИК В. П.** Физические основы процесса демпфирования колебаний в системе подвески автомобиля..... 62

**ШЕМЕНКОВ В. М., ШЕМЕНКОВА А. Л.**  
Структурно-фазовое модифицирование оксидной минералоке-  
рамики тлеющим разрядом ..... 78

### ФИЗИКА

**ХОМЧЕНКО А. В., ПРИМАК И. У., ВАСИЛЕНКО А. Н.**  
Анализ полей механических напряжений в закаленном стекле мето-  
дом поляризационной интерферометрии ..... 88

### ЭКОНОМИКА. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

**БЛАЖЕВИЧ Г. Н., ЖЕЛТОК Н. С.** О некоторых особенностях функционирования экономики Республики Беларусь и ее иннова-  
ционное развитие ..... 98

**ЛИВИНСКАЯ В. А., КОМАРОВА С. Л.** Оценка региональных различий, влияющих на внешнюю миграцию..... 107

**ЛОБАНОВА Т. М., ЛИВИНСКАЯ В. А.** Комплексная оценка привлекательности инвестиционных предложений ..... 115

- *Журнал включен в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим наукам*
- *Публикуемые материалы рецензируются*
- *Подписные индексы: для индивидуальных подписчиков – 00014  
для предприятий и организаций – 000142*

## CONTENTS

### MECHANICAL ENGINEERING

<b>VOIEVIDKO I. V., KOCHKODAN Y. M., VASKO A. I.</b> Development of the technique for determining the drilling index of anisotropy and estimation of its effect on the spatial orientation of wells .....	5
<b>GROMYKO P. N., KHATETOVSKY S. N., YURKOVA V. L.</b> Use of an elongated epicycloide for forming gear surfaces of excentric gears .....	14
<b>LESKOVETS I. V., SEMCHEN V. I., NAUMENKO A. E.</b> Calculation of parameters for the lifting mechanism of an electric hoist .....	22
<b>PASHKEVICH V. M.</b> Trained functional semantic networks for modeling technological objects .....	31
<b>SVIREPA D. M., SIAMIONAVA A. S., SUKHOTSKIY S. A.</b> Designs of tools for combined processing by cutting and surface plastic deformation with magneto-dynamic rollers .....	38
<b>SOTNIK L. L., RUSAN S. I., SIVACHENKO L. A.</b> Study of the interaction of the material point with a cylindrical eccentric .....	48
<b>TARASIK V. P.</b> On terminology in the field of automobile and tractor manufacturing .....	55
<b>TARASIK V. P.</b> Physical basics of the process of damping oscillations in the system of vehicle suspension .....	62
<b>SHEMENKOV V. M., SHEMENKOVA A. L.</b> Structural phase modification of oxide cutting ceramics by glow discharge.....	78

### PHYSICS

<b>KHOMCHENKO A. V., PRIMAK I. U., VASILENKO A. N.</b> Analysis of mechanical stress fields in tempered glass by means of polarization interferometry .....	88
--	----

**ECONOMICS. ECONOMIC SCIENCES**

<b>BLAZHEVICH G. N., ZHELTOK N. S.</b> On some specifics of functioning of the economy of the republic of Belarus and its innovative development .....	98
<b>LIVINSKAYA V. A., KOMAROVA S. L.</b> Assessment of regional differences affecting external migration.....	107
<b>LOBANOVA T. M., LIVINSKAYA V. A.</b> Complex evaluation of the attractiveness of investment proposals .....	115

---

МАШИНОСТРОЕНИЕ

---

УДК 622.243.273

*И. В. Воевидко, Я. М. Кочкодан, А. И. Васько*

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ БУРОВОГО ИНДЕКСА АНИЗОТРОПИИ И ОЦЕНКА ЕГО ВЛИЯНИЯ НА ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ОРИЕНТИРОВАНИЕ СКВАЖИН**

---

UDC 622.243.273

*I. V. Voievidko, Y. M. Kochkodan, A. I. Vasko*

**DEVELOPMENT OF THE TECHNIQUE FOR DETERMINING THE DRILLING INDEX OF ANISOTROPY AND ESTIMATION OF ITS EFFECT ON THE SPATIAL ORIENTATION OF WELLS**

---

**Аннотация**

Описано влияние анизотропии горных пород как одной из главных геологических причин на искривление вертикальных скважин. Показано влияние анизотропии на буримость горных пород. Приведены аналитические исследования для определения бурового индекса анизотропии при бурении наклонно залегающих пластов. Показана взаимосвязь между буровым индексом анизотропии, зенитным углом, углом наклона пластов, геометрическими размерами скважины, компоновкой низа бурильной колонны и осевой нагрузкой на долото. Проведены аналитические расчёты бурового индекса анизотропии на основании промышленных данных различных отложений и площадей. Описана методика и приведены результаты лабораторных исследований по определению бурового индекса анизотропии натуральных образцов горных пород и показано, что экспериментальные исследования подтвердили правильность аналитических расчётов.

**Ключевые слова:**

анизотропия, буримость, буровой индекс анизотропии, горная порода, зенитный угол, угол наклона пласта, нагрузка на долото, плоскость напластования, скважина, твёрдость породы.

**Abstract**

The article describes the influence of geological material anisotropy, as one of the main causes of the deviation of vertical wellbores. The effect of anisotropy on rock drillability is shown. The analytical research is presented for determining drilling index of anisotropy when drilling inclined formations. The relationship between the drilling index of anisotropy, the zenith angle of the well, the inclination angle of formations, geometric characteristics of the well, the bottom hole assembly of the drill string and the axial load on a bit is shown. Analytical calculations of the drilling index of anisotropy have been made on the basis of field data on different deposits and sludge. The technique is described and results of the laboratory studies to determine the drilling index of anisotropy of natural rock samples are given; it is also shown that experimental studies have confirmed the correctness of analytical calculations.

**Keywords:**

anisotropy, drillability, drilling index of anisotropy, geological material, zenith angle, formation inclination angle, bit load, layer of stratification, well, rock hardness.

---

При бурении любым из способов в той или иной мере имеет место самопроизвольное искривление ствола сква-

жин от заданного направления. Бурение искривлённой скважины связано со многими трудностями и поэтому меро-

приятия, осуществляемые с целью предотвращения её искривления, имеют важное значение в эффективности проведения буровых работ.

Степень и интенсивность искривления скважин определяется действием сложного комплекса факторов. На сегодняшний день считается, что на самопроизвольное искривление скважин влияют геологические, технические и технологические факторы. Поэтому для предотвращения произвольного искривления скважин нужна разработка комплекса технико-технологических мероприятий.

К основным геологическим причинам, которые влияют на самопроизвольное искривление скважин, относят анизотропность, слоистость, сланцеватость, трещиноватость горных пород, а также чередование горных пород разной твёрдости и угол залегания пластов.

Впервые степень влияния геологических факторов на самопроизвольное искривление скважин определили американские учёные А. Лубинский и Г. Вудс [2], которыми было предложено ввести понятие бурового индекса анизотропии. Ими была рассмотрена задача бурения в условиях наклонной скважины. Ученые проводили исследования с небольшими зенитными углами скважины и большой жёсткостью колонны труб, что достигается небольшими зазорами между колонной труб и стенкой скважины и минимальным внутренним диаметром колонны труб, а это на практике бурения существенно усложняет процесс промывки скважины. В научных работах А. Лубинского и Г. Вудса при определении значений бурового индекса анизотропии не были учтены углы залегания пластов и режимно-технологические параметры, такие как осевая нагрузка на долото и зазоры между колонной труб и стенкой скважины. Определение значения бурового индекса анизотропии в промышленных условиях – задача довольно трудоёмкая, поскольку возникает необходимость в обработке значительного

объёма геологического материала в лабораторных условиях.

Кроме А. Лубинского и Г. Вудса, этими исследованиями занимались такие учёные, как Н. Г. Серeda, Е. И. Ишем-гужин, А. Г. Калинин, С. С. Сулакшин, О. А. Марков, И. А. Васько, Н. И. Орынчак, М. П. Гулизаде, С. А. Оганов, В. Г. Григулецкий, В. Г. Лукьянов, Т. М. Боднарук, В. О. Белоруссов, В. В. Кривошеев, В. М. Мойсышин, В. В. Нескромных [1, 3–5, 7–18] и др.

Цель работы – разработка методики для определения бурового индекса анизотропии, включающей в себя как геологические, так и режимно-технологические факторы. Использование в будущем указанной методики должно обеспечить надёжное управление искривлением скважин в различных геологических условиях.

При бурении в анизотропных горных породах направление бурения не совпадает с направлением силы, которая действует на долото, как это происходит в изотропных породах. Для определения степени влияния анизотропии горных пород на произвольное искривление скважин были проведены аналитические исследования, где был рассмотрен случай бурения на границе пластов, в которой происходит изменение твёрдости и других свойств горных пород и наблюдается тенденция к изменению направления бурения скважины.

На рис. 1 представлена плоскость напластования горных пород, находящаяся под некоторым углом.  $O$  – текущая точка забоя наклонной скважины,  $H$  – нормальная составляющая забоя на долото,  $K$  – коэффициент пропорциональности, который зависит от свойств горных пород,  $r$  – зазор между нижней частью бурильной колонны и стенкой скважины,  $h_a$  – буровой индекс анизотропии,  $x_a$  – расстояние от долота до точки касания бурильной колонны со стенкой скважины,  $R$  – равнодействующая сил, действующих на долото,

$\gamma$  – угол залегания пластов горных пород,  $\varphi$  – угол между вертикалью и вектором нагрузки на забой,  $\Psi$  – поточный зенитный угол на выходе долота из пробуренного пласта горной породы,  $H \cdot K(1-h_a)$  – нормальная составляю-

щая реакции забоя на долото с учётом коэффициента пропорциональности и бурового индекса анизотропии,  $G_\delta \cdot H$  – нагрузка на долото с учётом коэффициента пропорциональности.

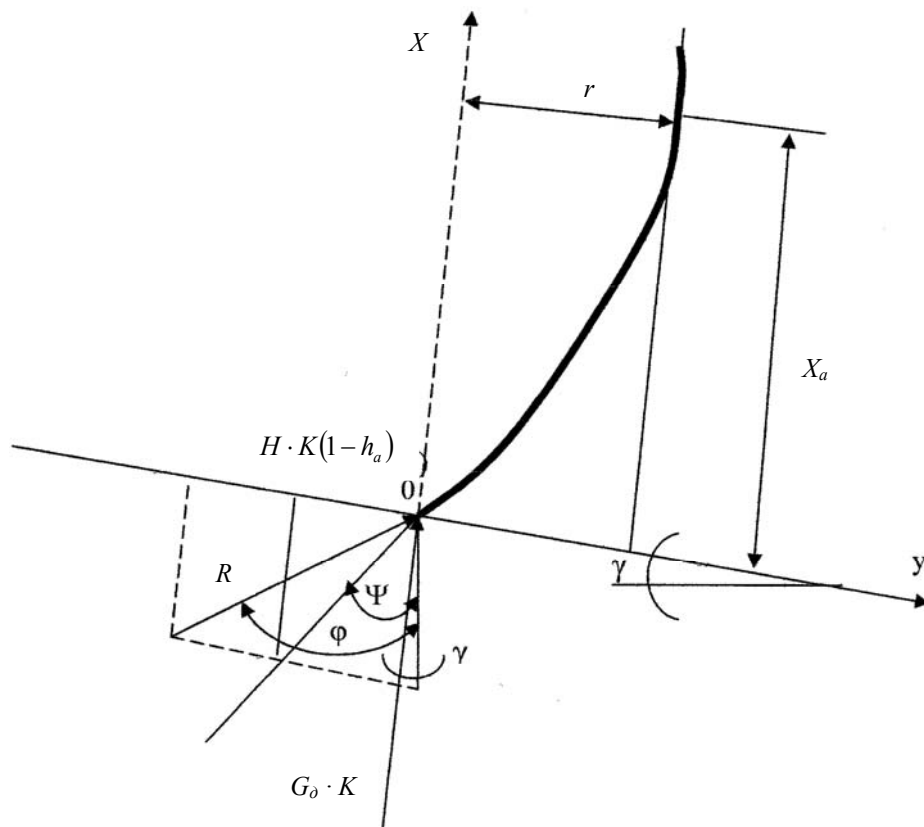


Рис. 1. Расчётная схема для определения бурового индекса анизотропии

При бурении в изотропных горных породах компоненты реакции забоя на долото будут охарактеризованы равнодействующей  $R$ , которая расположена к вертикали под углом  $\varphi$ .

$$\frac{H}{G_\delta} = \operatorname{tg}(\varphi - \gamma) = \frac{h}{X_2} \operatorname{tg} \alpha. \quad (1)$$

При бурении в анизотропных горных породах вследствие разницы направлений перпендикулярного и параллельного к залеганию пластов направление бурения не будет совпадать с направлением равнодействующих сил, а с направлением равнодействующих скоростей.

Считая, что скорость бурения в направлении координатных осей будет пропорциональна величине силы в этих же направлениях и то, что бурение параллельно в плоскости наслонения будет меньше на величину  $(1-h_a)H \cdot K$ , получим

$$\frac{K \cdot H(1-h_a)}{K \cdot G_\delta} = \operatorname{tg}(\psi - \gamma). \quad (2)$$

В результате проведённых аналитических исследований была выведена формула для определения бурового индекса анизотропии, которая отличается

от уже известной тем, что в ней учтены угол залегания пластов и режимно-технологические параметры бурения скважины. Данная формула включает в себя нормальную составляющую реакции забоя на долото и нагрузку на долото в безразмерных единицах. Чтобы определить значение бурового индекса анизотропии, нужно знать эти составляющие. Буровой индекс анизотропии определяется по результатам ранее пробуренных скважин на той или иной площади и его значение может быть принято за основу при расчленении геологического разреза за степенью влияния его на искривление скважин в зависимости от использованных компоновок низа бурильной колонны, режимно-технологических параметров и элементов залегания пластов.

$$h_a = \frac{\frac{h}{x_2} \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\cos^2(\gamma - \alpha) \cdot \left[ \frac{h}{x_2} \cdot \operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg}(\gamma - \alpha) \right]}, \quad (3)$$

где  $h$  – нормальная составляющая реакции забоя на долото в безразмерных единицах;  $x_2$  – осевая нагрузка на долото в безразмерных единицах;  $\alpha$  – зенитный угол скважины, град;  $\gamma$  – угол падения пластов, град.

$$h = \rho \left( \frac{x_2}{x_a} - 1 + \frac{2}{\pi} \right) - \frac{x_a}{2}, \quad (4)$$

где  $\rho$  – зазор между колонной труб и стенкой скважины в безразмерных единицах;  $x_a$  – расстояние от долота до точки касания бурильной колонны со стенкой скважины в безразмерных единицах.

$$\rho = \frac{r}{m \cdot \operatorname{tg} \alpha}, \quad (5)$$

где  $r$  – зазор между нижней частью бурильной колонны и стенкой скважины, м;  $m$  – коэффициент для перевода

значений из размерных единиц в безразмерные.

$$r = \frac{D_c - d_3}{2}, \quad (6)$$

где  $D_c, d_3$  – диаметр скважины и внешний диаметр бурильной колонны труб соответственно, м.

$$m = \sqrt[3]{\frac{E \cdot I}{q \cdot \cos \alpha}}, \quad (7)$$

где  $E$  – модуль упругости,  $E = 2,1 \cdot 10^{11}$  Па;  $I$  – осевой момент инерции,  $\text{м}^4$ ,

$$I = \frac{\pi}{64} \cdot (d_3^4 - d_6^4). \quad (8)$$

Вес единицы длины в буровом растворе

$$q = \frac{\pi}{4} \cdot (d_3^4 - d_6^4) \cdot (\rho_m - \rho_{np}), \quad (9)$$

где  $d_3, d_6$  – внешний и внутренний диаметры бурильной колонны труб соответственно, м;  $\rho_m, \rho_{np}$  – плотности материала труб (стали) и промывочной жидкости соответственно,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

$$x_a = 8 \frac{\rho}{x_a} - Ax_2 - Bx_a; \quad (10)$$

$$A = \frac{12}{\pi^2} - 1; \quad (11)$$

$$B = \frac{36}{\pi^2} \cdot \left( 1 - \frac{2}{\pi} - \frac{36}{\pi} - \frac{36}{\pi^2} \right); \quad (12)$$

$$x_2 = \frac{G_d}{m \cdot q \cdot \cos \alpha}, \quad (13)$$

где  $G_d$  – осевая нагрузка на долото, Н.

Уравнение (10) является трансцендентным, поэтому его решение возможно только методом итерации.

Таким образом, если известны зенитный угол  $\alpha$ , угол залегания пластов  $\gamma$



и режимно-технологические параметры  $h$  и  $x_2$ , в соответствии с формулой (3) можно определить буровой индекс анизотропии, а также степень его влияния на процесс изменения направления вектора движения долота и, как следствие, на процесс искривления скважин.

Рассчитав конкретное значение бурового индекса анизотропии при заданных значениях зенитного угла, угла залегания пласта, геометрических размерах скважины и компоновки низа бурильной колонны, представляется возможным определить осевую нагрузку на долото для конкретной КНБК по формуле

$$X_2 = \frac{h \cdot \operatorname{tg} \alpha [h_a \cdot \cos^2(\gamma - \alpha) - 1]}{h_a \cdot \cos^2(\gamma - \alpha) \cdot \operatorname{tg}(\gamma - \alpha)}. \quad (14)$$

Так как буровой индекс анизотропии определяют по результатам анализа

промышленных данных ранее пробуренных скважин, был собран промышленный материал результатов бурения скважин на месторождениях Прикарпатского региона. Для анализа были выбраны скважины с одинаковыми геологическими разрезами и приблизительно одинаковыми физико-механическими свойствами горных пород. Кроме того, бурение указанных скважин производилось однотипными КНБК и при одинаковых режимно-технологических параметрах.

Используя собранный промышленный материал, были проведены аналитические расчёты по определению бурового индекса анизотропии для различных горных отложений и площадей, а результаты этих расчётов приведены в табл. 1.

Табл. 1. Значения бурового индекса анизотропии по данным ранее пробуренных скважин, рассчитанные аналитическим путём

Горные отложения	Площадь (месторождение)				
	Северная Долина	Луква	Пасечная	2-Гвозд	Делятын
Быстрицкие	0,0405 ± 0,001	0,0138 ± 0,0081	0,045 ± 0,004	–	–
Выгодские	0,035 ± 0,001	–	–	–	–
Воротищенские	0,021 ± 0,005	–	–	0,05 ± 0,0015	0,0407 ± 0,001
Добротворские	–	–	–	0,045 ± 0,001	0,025 ± 0,001
Менилитовые	0,026 ± 0,001	0,038 ± 0,0015	0,028 ± 0,0019	–	–
Манявские	0,013 ± 0,005	–	0,058 ± 0,013	–	–
Ямненские	–	–	0,04 ± 0,0015	–	–
Поляницкие	0,025 ± 0,001	0,015 ± 0,0016	0,026 ± 0,0019	–	–
Слободские	–	–	–	0,03 ± 0,001	0,018 ± 0,0025

Для подтверждения полученных результатов аналитических расчётов бурового индекса анизотропии был проведен ряд лабораторных экспериментов по исследованию прочностных характеристик натуральных образцов горной породы (керн), отобранных из одинаковых

отложений при бурении различных скважин. Из отобранных кернов изготавливали цилиндрические образцы горной породы диаметром 40 мм и высотой 50 мм таким образом, чтобы площадь наложения была расположена перпендикулярно и параллельно высоте.

В соответствии с [6] в образец горной породы посредством пресса со скоростью 0,5 МПа/с вдавливали цилиндрический штамп диаметром 2,5 мм до момента разрушения образца. В то же время фиксировали давление с помощью манометра и деформацию с помощью индикатора. Сначала вдавливание штампа производили перпендикулярно наслоению, а потом для той же породы параллельно напластованию. По данным экспериментальных исследований строили график зависимости изменения деформации от нагрузки, определяли твердость горной породы и коэффициент пластичности. Также определяли условные показатели буримости по формуле

$$\delta = \frac{10^{10}}{A \cdot p_{ш} \cdot K_{пл}}, \quad (15)$$

где  $\delta$  – буримость горной породы;  $A$  – абразивность горной породы, мг;  $p_{ш}$  – твердость горной породы, Па;  $K_{пл}$  – коэффициент пластичности горной породы.

Следует отметить, что абразивность и коэффициент пластичности горной породы одинаковы как при исследовании перпендикулярно наслоению, так и параллельно наслоению. Поэтому буровой индекс анизотропии можно определять при проведении лабораторных исследований по давлению, при котором разрушался образец горной породы перпендикулярно и параллельно наслоению. Например, при вдавливании цилиндрического штампа диамет-

ром 2,5 мм в подготовленный образец горной породы из менилитовых отложений перпендикулярно наслоению разрушение произошло при давлении 34,4 МПа, а при параллельном наслоении – при давлении 35,3 МПа.

$$\left. \begin{aligned} h_a &= 1 - a = 1 - \frac{V_{\perp}}{V_{\parallel}} = 1 - \frac{\delta_{\perp}}{\delta_{\parallel}}; \\ h_a &= 1 - \frac{\frac{10^{10}}{A \cdot p_{ш\parallel} \cdot K_{пл}}}{\frac{10^{10}}{A \cdot p_{ш\perp} \cdot K_{пл}}} = 1 - \frac{p_{ш\perp}}{p_{ш\parallel}}, \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

где  $p_{ш\perp}, p_{ш\parallel}$  – твердости образца горной породы перпендикулярно и параллельно наслоению соответственно, МПа;  $V_{\perp}, V_{\parallel}$  – механические скорости бурения перпендикулярно и параллельно наслоению соответственно, м/ч.

Для образца горной породы из менилитовых отложений получено следующее значение бурового индекса анизотропии:

$$h_a = 1 - \frac{34,4}{35,3} = 0,0255.$$

Аналогично были проведены экспериментальные исследования прочностных характеристик образцов различных отложений горных пород с целью определения бурового индекса анизотропии, а результаты расчетов представлены в табл. 2.

Табл. 2. Значения бурового индекса анизотропии по результатам экспериментальных исследований

Горные отложения	Буровой индекс анизотропии
Менилитовые	0,0255
Поляницкие	0,018
Манявские	0,015
Выгодские	0,028
Ямненские	0,033
Быстрицкие	0,041

Анализируя результаты проведённых лабораторных исследований, можно сделать вывод, что значения бурового индекса анизотропии, определённые экспериментальным путём, совпадают с результатами аналитических расчётов с допустимой для практических расчётов погрешностью.

На основании проведённых расчётов значений бурового индекса анизотропии различными методами, обработав данные посредством ЭВМ, были построены номограммы, с помощью которых графоаналитическим методом можно определять нужную создаваемую осевую нагрузку на долото при различных компоновках низа бурильной колонны и параметрах залегания пластов горных пород для достижения проектных зенитных углов скважины или создания условий для их стабилизации. Также данные номограммы в дальнейшем можно использовать для определения места установки опорно-центрирующих приспособлений с целью обеспечения стабильной работы низа бурильной колонны и пространственного ориентирования оси скважины с учётом режимно-технологических параметров и углов залегания пластов горных пород.

Следовательно, при бурении скважин в наклонно залегающих пластах при проектировании осевой нагрузки на долото и КНБК с целью предотвращения самопроизвольного искривления скважин необходимо учитывать буровой индекс анизотропии.

Для промышленного подтверждения действенности разработанной методики определения бурового индекса анизотропии было проведено

бурение некоторых интервалов на скважинах Струтынской площади Прикарпатского региона с учётом бурового индекса анизотропии, рассчитанного за предложенной методикой. Для промышленных исследований была выбрана скважина № 122 – Струтын, которая по результатам рядом пробуренных скважин закладывается в условиях интенсивного естественного набора кривизны. Для сравнения полученных результатов выбрана скважина № 111 – Струтын, которая находится поблизости и имеет аналогичный геологический разрез.

В результате бурения скважины № 112 – Струтын с учётом бурового индекса анизотропии для выбранных интервалов было обеспечено уменьшение интенсивности искривления ствола скважины. Значения зенитных углов в интервалах, пробуренных с использованием разработанных рекомендаций, были близки к ожидаемым и находились в пределах от 1 до 6° против 12...13° в скважинах, которые бурились без учёта указанных рекомендаций. Осложнений в процессе бурения скважин при внедрении рекомендаций не наблюдалось. Результаты инклинометрических измерений зенитного и азимутального углов в скважинах № 111 и 112 – Струтын приведены в табл. 3.

Достоверность эффективности практического применения разработанной методики была подтверждена протоколом передачи методики определения бурового индекса анизотропии Прикарпатскому управлению буровых работ.

Табл. 3. Результаты инклинометрии скважин № 111 и 112 – Струтын

Скважина № 112 – Струтын					Скважина № 111 – Струтын				
Глубина, м	Кривизна		Нагрузка на долото, кН	Средняя проходка	Глубина, м	Кривизна		Нагрузка на долото, кН	Средняя проходка
	угол	азимут, град				угол	азимут, град		
200	1°15'	–	40	24	200	2°15'	80	40	24
250	1°15'	45	50	70	250	4°30'	110	50	66
300	1°30'	95	60	52	300	5°30'	98	60	62
350	1°30'	82	60	58	350	6°15'	90	60	63
400	1°30'	80	60	58	400	6°00'	85	60	58
450	1°30'	75	60	62	450	4°30'	73	60	58
500	1°30'	82	60	66	500	4°15'	62	60	62
550	1°45'	63	60	88	550	4°15'	52	60	93
600	1°45'	45	80	90	600	4°00'	42	80	93
1200	5°15'	171	80	87	1200	8°00'	234	80	87
1250	5°45'	162	80	32	1250	11°15'	190	80	27
1300	5°30'	167	80	70	1300	13°00'	200	80	73
1350	5°00'	167	80	65	1350	12°3'	203	80	73
1400	6°15'	173	80	45	1400	12°15'	200	80	25
1450	6°30'	180	80	86	1450	12°00'	202	80	90
1500	6°00'	185	80	45	1500	12°30'	212	80	34
1550	6°45'	175	80	70	1550	12°15'	200	80	76
1600	7°15'	168	80	72	1600	12°00'	202	80	63
1650	8°00'	170	80	27	1650	12°30'	212	80	19

### Выводы

1. Выведена формула для определения бурового индекса анизотропии в наклонно залегающих пластах.

2. Установлена взаимосвязь между буровым индексом анизотропии, зенитным углом, углом наклона пластов, компоновкой низа бурильной колонны, геометрическими размерами скважины и осевой нагрузкой на долото.

3. Значения бурового индекса анизотропии, определённые экспери-

ментальным путём, совпадают с результатами аналитических расчётов с допустимой для практических расчётов погрешностью.

4. Достоверность эффективности практического применения разработанной методики определения бурового индекса анизотропии была подтверждена результатами бурения скважин с её учётом на площадях Прикарпатского региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Калинин, А. Г.** Естественное и искусственное искривление скважин / А. Г. Калинин, В. В. Кульчицкий. – Москва : Регулярная и хаотическая динамика ; Ижевск : Ин-т компьютер. исслед., 2006. – 640 с.
2. **Вудс, Г.** Искривление скважин при бурении / Г. Вудс, А. Лубинский. – Москва : Гостоптехиздат, 1960. – 161 с.
3. **Калинин, А. Г.** Бурение наклонных скважин : справочник / А. Г. Калинин, Н. А. Григорян, Б. З. Султанов. – Москва : Недра, 1990. – 348 с.
4. **Кривошеев, В. В.** Искривление скважин в анизотропных породах / В. В. Кривошеев. – Томск : НТЛ, 1999. – 86 с.
5. **Сулакшин, С. С.** Направленное бурение / С. С. Сулакшин. – Москва : Недра, 1987. – 272 с.
6. **Спивак, А. И.** Механика горных пород / А. И. Спивак. – Москва : Недра, 1967. – 192 с.
7. Влияние анизотропии пород на процесс пространственного искривления / М. П. Гулизаде, Г. М. Зельманович, Л. Я. Кауфман, Л. Я. Сушон // Изв. вузов. Нефть и газ. – 1975. – № 8. – С. 13–16.
8. **Белоруссов, В. О.** Прогнозирование и расчёт естественного искривления скважин : справочное пособие / В. О. Белоруссов, Т. М. Боднарук. – Москва : Недра, 1988. – 175 с.
9. **Воевідко, І. В.** Оцінка впливу анізотропних геологічних структур на тенденцію похилоспрямованих свердловин до зміни азимута / І. В. Воевідко // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. – 2003. – № 3 (8). – С. 28–31.
10. **Григулецкий, В. Г.** Проектирование компоновок нижней части буровой колонны / В. Г. Григулецкий, В. Т. Лукьянов. – Москва : Недра, 1990. – 302 с.
11. **Калинин, А. Г.** Влияние анизотропности пород на искривление буровых скважин / А. Г. Калинин, В. О. Белоруссов // Нефтяное хозяйство. – 1963. – № 3. – С. 8–12.
12. **Крижанівський, Є. І.** Вплив анізотропії гірських порід на зенітне викривлення свердловин з врахуванням їх орієнтації відносно геологічної структури / Є. І. Крижанівський, І. В. Воевідко // Нафтова і газова промисловість. – 2003. – № 6. – С. 20–22.
13. Определение индекса анизотропии пород и фрезерующей способности долота по темпам искривления стволов скважин / М. П. Гулизаде, Г. М. Зельманович, Л. Я. Кауфман, Л. Я. Сушон // Изв. вузов. Нефть и газ. – 1972. – № 10. – С. 20–46.
14. **Александров, М. М.** О факторах, влияющих на искривление скважин / М. М. Александров, В. Г. Григулецкий, В. Г. Лукьянов // Тр. УфНИИ. – 1980. – Вып. 7. – С. 16–20.
15. **Боярко, Ю. Л.** Анизотропия механических свойств пород как причина искривления / Ю. Л. Боярко // Нефтяное хозяйство. – 1964. – № 3. – С. 15–18.
16. **Фоменко, И. К.** Математическое моделирование напряжённого состояния инженерно-геологического массива, сложенного анизотропными горными породами : дис. ... канд. геолого-минералог. наук / И. К. Фоменко. – Москва, 2000.
17. **Литвинский, Г. Г.** Слоистость и анизотропия прочности горных пород / Г. Г. Литвинский // Сб. науч. тр. Донбас. гос. техн. ун-та. – Алчевск, 2015. – Вып. 45. – С. 5–12.
18. **Нескромных, В. В.** Анализ влияния анизотропии горных пород на процесс искривления скважин при их разрушении механическими и термическими способами / В. В. Нескромных // Изв. Том. политехн. ун-та. – 2013. – Т. 323, № 1.

*Статья сдана в редакцию 20 декабря 2018 года*

**Игорь Владимирович Воевидко**, д-р техн. наук, проф., Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа. Тел.: +0342-72-71-37.

**Ярослав Михайлович Кочкодан**, канд. техн. наук, доц., Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа. Тел.: +0342-72-71-37.

**Андрей Иванович Васько**, ассистент, Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа. E-mail: super.vasko1970@ukr.net.

**Igor Vladimirovich Voievidko**, DSc (Engineering), Prof., Ivano-Frankovsk National Technical University of Oil and Gas. Phone: +0342-72-71-37.

**Yaroslav Michajlovych Kochkodan**, PhD, (Engineering), Associate Prof., Ivano-Frankovsk National Technical University of Oil and Gas. Phone: +0342-72-71-37.

**Andrij Ivanovych Vas'ko**, assistant lecturer, Ivano-Frankovsk National Technical University of Oil and Gas. E-mail: super.vasko1970@ukr.net.

---

УДК 621.833

*П. Н. Громыко, С. Н. Хатетовский, В. Л. Юркова*

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УДЛИНЕННОЙ ЭПИЦИКЛОИДЫ ДЛЯ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ЗУБЧАТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПЕРЕДАЧ ЭКСЦЕНТРИКОВОГО ТИПА**

---

UDC 621.833

*P. N. Gromyko, S. N. Khatetovsky, V. L. Yurkova*

**USE OF AN ELONGATED EPICYCLOIDE FOR FORMING GEAR SURFACES OF EXCENTRIC GEARS**

---

**Аннотация**

Обоснована целесообразность применения удлиненной эпициклоиды для формообразования зубчатых поверхностей передач эксцентрикового типа. Приведена схема для определения соотношений геометрических параметров звеньев в передаче эксцентрикового типа. Получена зависимость для определения механических потерь в зацеплении для структурной схемы рассматриваемого варианта передачи. Разработана компьютерная модель и проведены ее исследования.

**Ключевые слова:**

прецессионная передача, передача эксцентрикового типа, прецессионный мотор-редуктор, механические потери, укороченная эпициклоида, удлиненная эпициклоида.

**Abstract**

The article presents the rationale for the use of an elongated epicycloid for forming gear surfaces of eccentric gears. A scheme is given to determine ratios of geometric parameters of the links in the transmission of the eccentric type. A dependence has been obtained for determining mechanical losses in the gearing for the block diagram of the transmission variant under consideration. A computer model has been developed and researched.

**Keywords:**

precessional gear, eccentric type transmission, precession motor-reducer, mechanical losses, shortened epicycloid, elongated epicycloid.

---

**Введение**

Среди всех видов механических передач наибольшее распространение в приводных механизмах различного назначения получила механическая передача с эвольвентным зацеплением зубчатых колес.

Применение в механических передачах колес с эвольвентными профилями зубьев позволило обеспечить им низкую чувствительность выходных показателей к погрешностям изготовления и сборки, а также к упругим перемеще-

ниям звеньев по сравнению с зубчатыми передачами, использующими другие формы зубчатых профилей.

Это и предопределило широкое распространение эвольвентной зубчатой передачи в различных приводных устройствах, хотя по массогабаритным показателям, а также по возможности трансформировать вращения с большими значениями коэффициента редуцирования на одной ступени данные передачи уступают другому типу механических передач – передачам эксцентрикового типа [1, 2].

Серийное производство планетарных передач эксцентрикового типа налажено известными мировыми фирмами на основе использования в зацеплении зубьев с циклоидальными профилями контактирующих поверхностей. Однако высокая отпускная цена на указанные передачи, обусловленная необходимостью для их изготовления применением специальных материалов, видов термомеханической обработки, оборудования и инструмента, ограничивает, а иногда делает и невозможным, их применение в приводах различных машин и механизмов.

Поэтому актуальной является задача совершенствования передач эксцентрикового типа в направлении снижения себестоимости их изготовления.

Анализ контактного взаимодействия зубьев в зацеплении планетарных передач эксцентрикового типа позволил установить, что при небольшом отклонении реальной геометрии зацепления от теоретически рассчитанной происходит резкое ухудшение их эксплуатационных показателей [3]. Причем, как показали экспериментальные исследования, вышеуказанные отклонения могут быть вызваны погрешностями изготовления и сборки звеньев, а также их упругими перемещениями и износом контактирующих поверхностей при работе эксцентриковой передачи под нагрузкой.

Минимизация погрешностей изготовления и упругих перемещений звеньев стандартными способами, т. е. за счет повышения массогабаритных размеров эксцентриковой передачи и использования специальных технологий упрочнения и термомеханической обработки, приводит к значительному росту себестоимости их изготовления.

Другой путь снижения себестоимости изготовления и сборки передачи эксцентрикового типа при сохранении на необходимом для ее нормальной работы уровне служебных свойств возмо-

жен за счет применения в ее зацеплении специальных профилей контактирующих зубьев.

Далее приведено обоснование целесообразности применения удлиненной эпициклоиды для формообразования зубчатых поверхностей передач эксцентрикового типа.

***Оценка механических потерь в зацеплении эксцентриковой передачи с зубьями сателлита, формованными эпициклоидальными кривыми***

Наиболее известным вариантом эксцентриковой передачи, серийное производство которого освоено ведущими мировыми фирмами, является планетарная эксцентриковая передача типа К-Н-V.

На рис. 1 показана структурная схема передачи эксцентрикового типа, в которой ролики закреплены в неподвижном центральном колесе 2. Вращение от кривошипного вала 1 трансформируется в плоскопараллельное движение сателлита 3 благодаря взаимодействию зубчатой поверхности сателлита 3 с неподвижными роликами центрального колеса 2. Механизм параллелограмма 4 позволяет передать вращательную составляющую плоскопараллельного движения сателлита 3 на выходное звено 5.

В зацеплении планетарных передач эксцентрикового типа применяются зубья сателлита с участками поверхностей, формованными по укороченной, обыкновенной и удлиненной эпициклоидам.

Однако возможны варианты эксцентриковой передачи с участками поверхности зуба сателлита, изготовленными только по укороченным или только по удлиненным эпициклоидам. Это достигается при формовании зубьев сателлита путем увеличения или уменьшения эксцентриситета кривоши-

па  $e$  при сохранении таких параметров зацепления, как радиус расположения роликов центрального колеса  $R$ , число

роликов  $z$ , определяющее передаточное отношение (рис. 2).

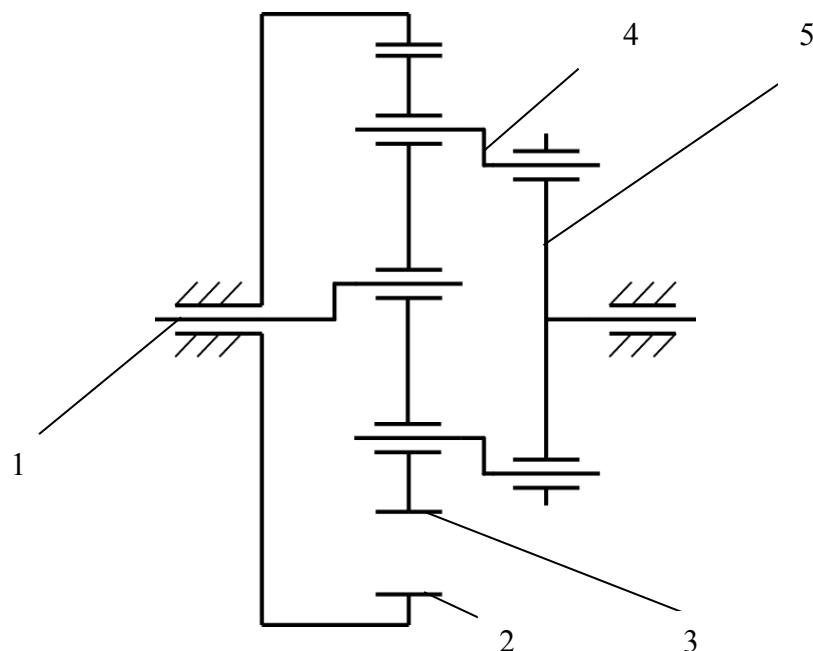


Рис. 1. Структурная схема планетарной эксцентриковой передачи типа К-Н-V: 1 – кривошипный вал; 2 – центральное колесо; 3 – сателлит; 4 – механизм параллелограмма; 5 – выходное звено

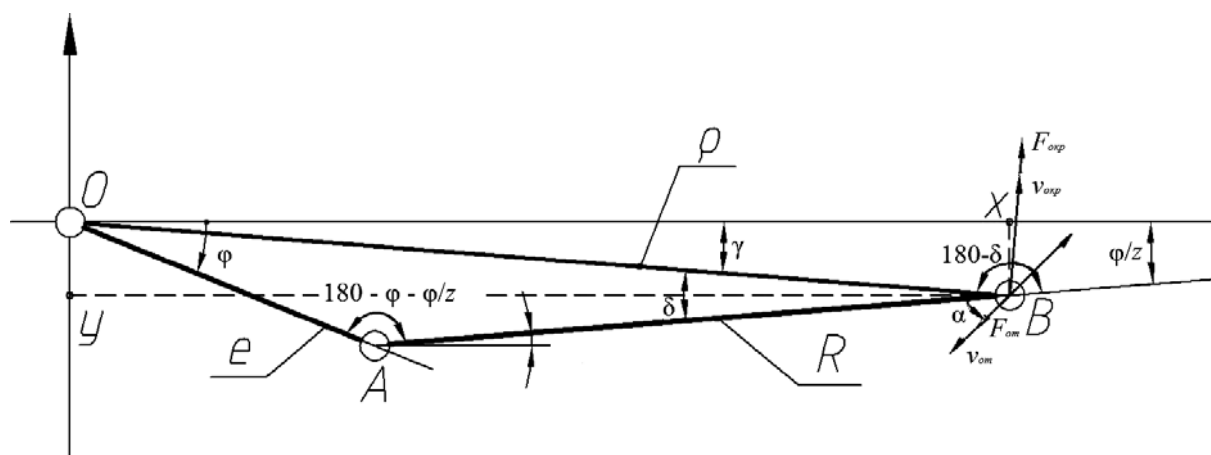


Рис. 2. Схема для определения соотношений геометрических параметров звеньев в передаче эксцентрикового типа

Одним из основных критериев выбора формы поверхности зуба являются механические потери в зацеплении эксцентриковой передачи. Поэтому вопрос установления влияния формы зубьев сателлита на значения механических

потерь в зацеплении эксцентриковой передачи наиболее важен.

Механические потери в зацеплении оцениваются из соотношения затраченной и полезной мощностей, которые, в свою очередь, определяются по



значениям сил и скоростей в контакте взаимодействующих звеньев:

$$\xi = \frac{N_{затр.}}{N_{полез.}} = \frac{F_{мп} V_{от}}{F_{окр} V_{окр}}. \quad (1)$$

На основе формулы (1), а также используя геометрические соотношения параметров звеньев эксцентриковой передачи, полученные согласно рис. 2, были определены следующие формулы для оценки механических потерь в зацеплении эксцентриковой передачи:

$$\xi = \left( \frac{z \cdot f \cdot \sqrt{e^2 + (R^2/z^2)} - 2 \cdot (R/z) \cdot e \cdot \cos(\varphi + (\varphi/z))}{\rho \cdot \cos(\delta + (\alpha - \varphi/z))} \right); \quad (2)$$

$$\rho = \sqrt{e^2 + R^2 - 2 \cdot R \cdot e \cdot \cos(\varphi + (\varphi/z))}; \quad (3)$$

$$\delta = \arcsin \left( \frac{e \cdot \sin(\varphi + (\varphi/z))}{\rho} \right); \quad (4)$$

$$\alpha = \arccos \left( \frac{(e \cdot \sin \varphi - (R/z) \sin(\varphi/z))}{\sqrt{e^2 + (R^2/z^2)} - 2 \cdot (R/z) \cdot e \cdot \cos(\varphi + (\varphi/z))} \right), \quad (5)$$

где  $\xi$  – коэффициент механических потерь в зацеплении;  $z$  – число зубьев сателлита;  $\varphi$  – угол поворота входного кривошипа;  $R$  – радиус точки сателлита, образующей циклоиду;  $f$  – коэффициент трения;  $e$  – величина эксцентриситета.

На рис. 3 представлены графические зависимости значений механических потерь  $\xi$  в зацеплении эксцентриковой передачи от угла поворота кривошипа  $\varphi$  в случае использования при формообразовании поверхностей сателлита различных видов эпициклоиды.

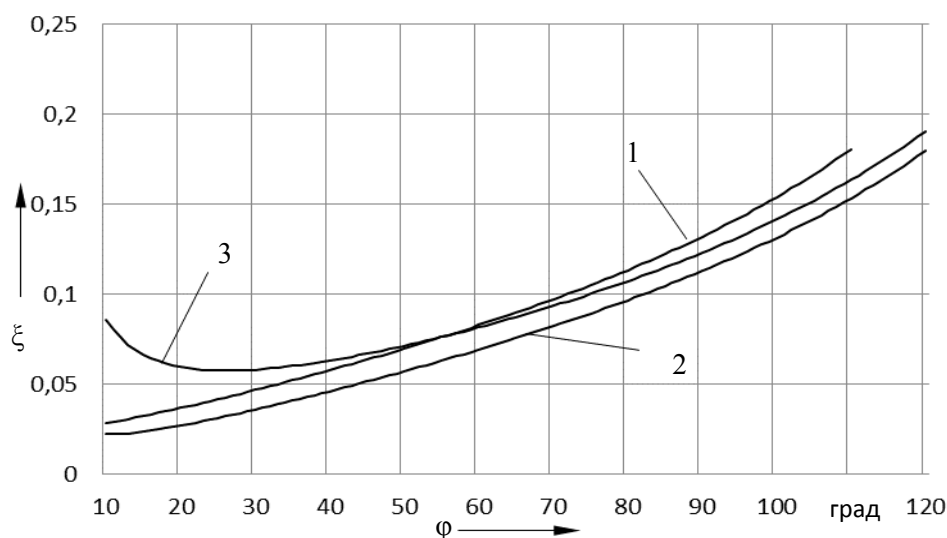


Рис. 3. Зависимости значений механических потерь  $\xi$  в зацеплении эксцентриковой передачи от угла поворота кривошипа: 1 – при формообразовании поверхностей зубьев сателлита по укороченной эпициклоиде; 2 – при формообразовании поверхностей зубьев сателлита по обыкновенной эпициклоиде; 3 – при формообразовании поверхностей зубьев сателлита по удлиненной эпициклоиде

Как видно из графиков, изображенных на рис. 3, значения механических потерь в зацеплении эксцентриковой передачи при формообразовании поверхностей зубьев сателлита различными видами эпициклоиды незначительно отличаются друг от друга. Следовательно, такой критерий, как механические потери, не является определяющим при выборе вида эпициклоиды при формообразовании зубьев сателлита эксцентриковой передачи в случае, когда погрешности изготовления и упругие перемещения звеньев в эксцентриковой передаче равны нулю.

Учитывая то, что получение аналитических зависимостей для оценки влияния формы профилей зубьев сателлита на основные эксплуатационные показатели эксцентриковой передачи при наличии погрешностей изготовления и упругих деформаций звеньев яв-

ляется сложной задачей, далее приведены результаты компьютерного моделирования в среде САПР Siemens NX.

**Сравнительные компьютерные исследования эксцентриковых передач по оценке КПД и плавности вращения выходного вала при наличии погрешностей изготовления и упругих деформаций звеньев**

Основными выходными показателями механических передач, позволяющими судить об уровне их служебных свойств, являются КПД и плавность вращения выходного вала. Для проведения сравнительного анализа указанных показателей эксцентриковой передачи с зубьями, выполненными по укороченной (рис. 4, а) и удлиненной (рис. 4, б) эпициклоидам, были разработаны их компьютерные модели.

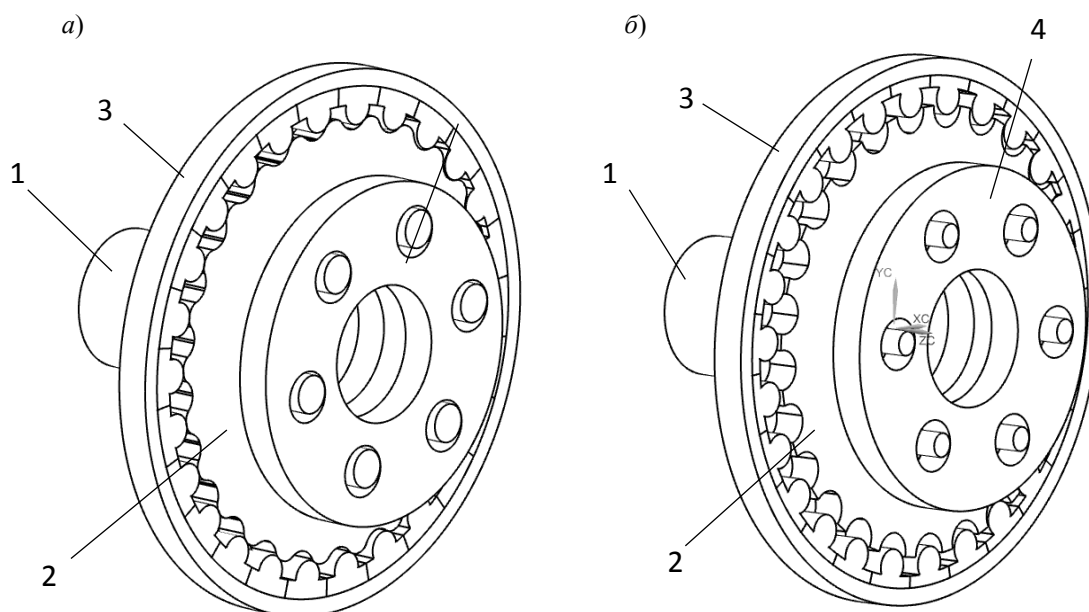


Рис. 4. Компьютерные модели эксцентриковой передачи: а – с зубьями сателлита, выполненными по укороченной эпициклоиде; б – с зубьями сателлита, выполненными по удлиненной эпициклоиде; 1 – входной вал; 2 – центральное колесо с роликами; 3 – сателлит; 4 – выходное звено

Исследования компьютерных моделей сравниваемых вариантов эксцентриковых передач проводились в соответствии с методиками, изложенными в [4].

Для оценки КПД и плавности вращения выходного вала эксцентриковых передач при наличии погрешностей изготовления звеньев центральное коле-

со с роликами 2 компьютерной модели было смещено относительно оси вращения входного вала 1 на величину погрешности. При этом в разработанной модели была также смоделирована упругая связь во вращательной паре эксцентриковой части входного вала 1 и сателлита 3. Это позволило создать

путем задания жесткости в указанной связи имитацию упругого перемещения звеньев передачи под нагрузкой.

Результаты компьютерных исследований компьютерных моделей эксцентриковой передачи отражены на графиках (рис. 5 и 6).

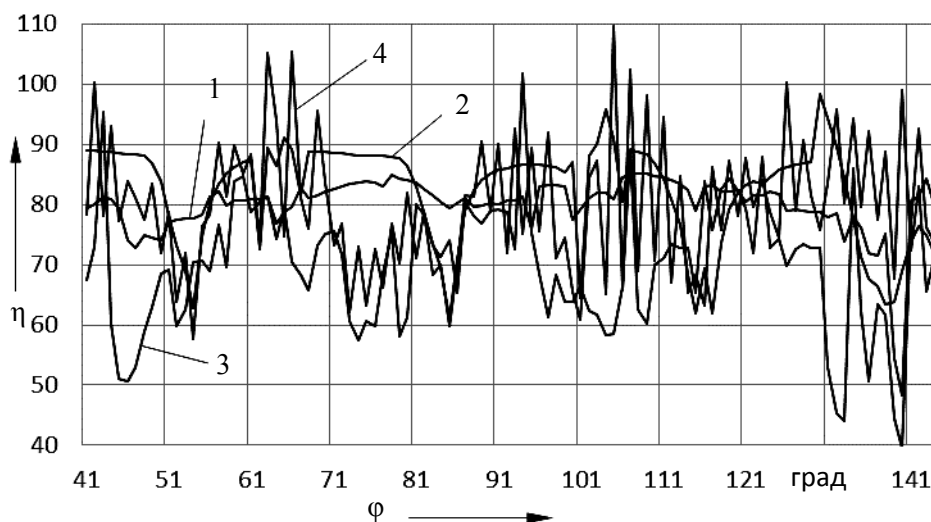


Рис. 5. Зависимость КПД зацепления эксцентриковой передачи от угла поворота входного вала: 1 – с зубьями сателлита, выполненными по укороченной эпициклоиде, при отсутствии погрешностей и упругих деформаций звеньев; 2 – с зубьями сателлита, выполненными по укороченной эпициклоиде, при наличии погрешностей и упругих деформаций звеньев; 3 – с зубьями сателлита, выполненными по удлиненной эпициклоиде, при отсутствии погрешностей и упругих деформаций звеньев; 4 – с зубьями сателлита, выполненными по удлиненной эпициклоиде, при наличии погрешностей и упругих деформаций звеньев

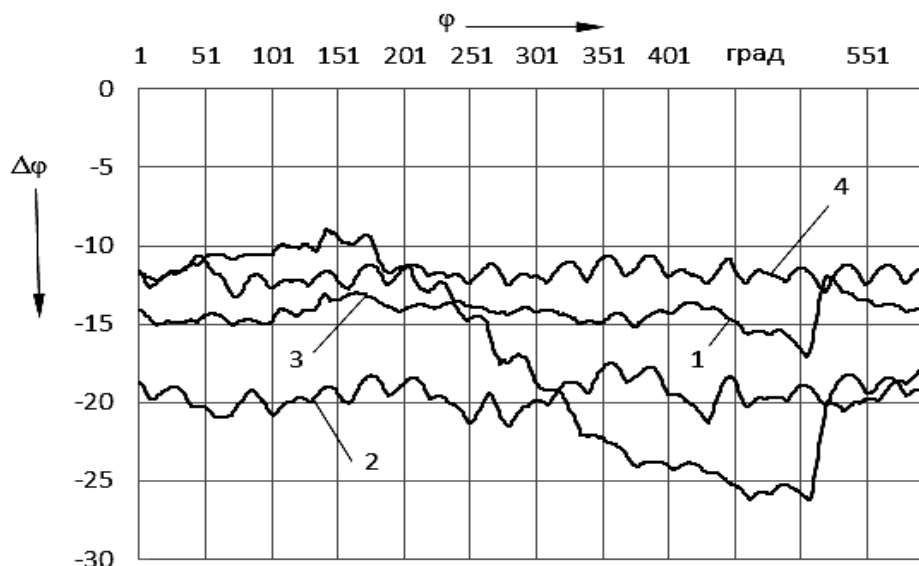


Рис. 6. Зависимость кинематической погрешности вращения выходного вала эксцентриковой передачи от угла поворота входного вала: 1 – с зубьями сателлита, выполненными по укороченной эпициклоиде, при отсутствии погрешностей и упругих деформаций звеньев; 2 – с зубьями сателлита, выполненными по укороченной эпициклоиде, при наличии погрешностей и упругих деформаций звеньев; 3 – с зубьями сателлита, выполненными по удлиненной эпициклоиде, при отсутствии погрешностей и упругих деформаций звеньев; 4 – с зубьями сателлита, выполненными по удлиненной эпициклоиде, при наличии погрешностей и упругих деформаций звеньев

Анализ графических зависимостей, изображенных на рис. 5 и 6, позволяет сделать следующие выводы:

– при отсутствии погрешностей изготовления и упругих деформаций звеньев КПД в зацеплении эксцентриковых передач с зубьями сателлита, выполненными по удлиненной эпициклоиде, незначительно выше (на 2...3 %), чем КПД передач с зубьями сателлита, выполненными по укороченной эпициклоиде. Показатель кинематической погрешности вращения выходного вала незначительно (порядка 1 угловой единицы), но также выше у передач с удлиненной эпициклоидой;

– при наличии погрешностей изготовления и упругих деформаций звеньев КПД в зацеплении эксцентриковой передачи, зубья которой выполнены по удлиненной эпициклоиде, остался на том же уровне (82 %), а КПД эксцентриковой передачи с зубьями, выполненными по укороченной эпициклоиде, снизился в среднем до 76 %. В то же время небольшое снижение кинематической погрешности вращения выходного вала при использовании удлиненной эпициклоиды при формировании зубчатой поверхности сателлита произошло даже при наличии погрешностей изготовления и упругих деформаций звеньев. При этом значение кинематической погрешности у эксцентриковых передач, использующих для формообразования укороченную эпициклоиду, возросло более чем в 3 раза.

Таким образом, основные выходные показатели эксцентриковой передачи с зубьями сателлита, выполненными по удлиненной эпициклоиде, менее чувствительны к наличию погрешностей изготовления и упругих деформа-

ций звеньев, чем эти же показатели эксцентриковой передачи с зубьями сателлита, выполненными по укороченной эпициклоиде.

### **Заключение**

Обосновывается целесообразность формообразования зубьев сателлита эксцентриковой передачи по удлиненной эпициклоиде. Анализ механических потерь в зацеплении эксцентриковой передачи позволил установить, что при отсутствии погрешностей изготовления и упругих деформаций звеньев форма поверхности зубьев незначительно влияет на КПД и плавность вращения выходного вала. При наличии погрешностей изготовления и упругих деформаций звеньев происходит снижение значения КПД и резкий рост значений кинематической погрешности вращения выходного вала в зацеплении эксцентриковых передач с формой зуба сателлита, выполненной по укороченной эпициклоиде. Следовательно, эксцентриковая передача с формой зуба сателлита, выполненной по удлиненной эпициклоиде, подобно преимуществам, получаемым от применения эвольвенты для традиционных зубчатых передач, имеет свойство низкой чувствительности ее основного показателя к погрешностям изготовления и упругим перемещениям звеньев. Поэтому изготовление и сборка эксцентриковой передачи с формой зубьев, выполненных по удлиненной эпициклоиде, может осуществляться по более низкой себестоимости, что позволит расширить ее применение в приводных механизмах различного назначения.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Шанников, В. М. Планетарные редукторы с внецентроидным зацеплением / В. М. Шанников. – Москва : Машгиз, 1948. – 172 с.
2. Борисенко, Л. А. Малогабаритные передаточные механизмы для мехатронных устройств : [монография] / Л. А. Борисенко. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2013. – 187 с. : ил.

3. **Gromyko, P. N.** Modeling of eccentric transmission operation in presence of elastic deformations of contacting links / P. N. Gromyko, S. N. Khatetovsky // Proceedings of the International Conference «Aviamechanical Engineering and Transport». – 2018. – Vol. 158. – P. 160–164.

4. Компьютерное моделирование планетарных прецессионных передач : [монография] / П. Н. Громько [и др.] ; под общ. ред. П. Н. Громько. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2007. – 271 с. : ил.

*Статья сдана в редакцию 20 декабря 2018 года*

**Петр Николаевич Громько**, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет.  
E-mail: grom\_7@tut.by.

**Станислав Николаевич Хатетовский**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.  
E-mail: mechlab@yandex.ru.

**Виктория Леонидовна Юркова**, инженер, Белорусско-Российский университет.

**Petr Nikolayevich Gromyko**, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University. E-mail: grom\_7@tut.by.

**Stanislav Nikolayevich Khatetovsky**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.  
E-mail: mechlab@yandex.ru.

**Viktoriya Leonidovna Yurkova**, engineer, Belarusian-Russian University.

---

УДК 621.873.1

*И. В. Лесковец, В. И. Сёмчен, А. Е. Науменко*

## РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЗМА ПОДЪЕМА ЭЛЕКТРОТАЛИ

---

UDC 621.873.1

*I. V. Leskovets, V. I. Semchen, A. E. Naumenko*

## CALCULATION OF PARAMETERS FOR THE LIFTING MECHANISM OF AN ELECTRIC HOIST

---

### **Аннотация**

Определена необходимость проектирования электроталей грузоподъемностью до 70 т. Проанализированы методики расчета параметров механизма подъема. Установлено, что отсутствуют четкие методики выбора кратности полиспаста, позволяющие достичь минимальной массы. Определен диапазон грузоподъемности, при котором кратность полиспаста не оказывает влияния на массу механизма. Выявлено, что увеличение кратности полиспаста приводит к значительному уменьшению требуемого вращающего момента. Установлены рекомендуемые кратности полиспаста при различных значениях грузоподъемности.

### **Ключевые слова:**

электроталь, механизм подъема, кратность полиспаста, масса механизма подъема.

### **Abstract**

The necessity of designing electric hoists with up to 70 tons lifting capacity has been determined. Methods for calculating parameters of the lifting mechanism have been analyzed. It has been established that there are no clear techniques for choosing the polyspast multiplicity which allow the minimum mass to be achieved. The range of lifting capacity has been determined, at which the polyspast multiplicity does not affect the mass of the mechanism. It has been found that an increase in the polyspast multiplicity leads to a significant reduction in the required torque. The recommended multiplicities of the polyspast have been established for various values of carrying capacity.

### **Keywords:**

electric hoist, lifting mechanism, polyspast multiplicity, weight of lifting mechanism.

---

Электроталь – это наиболее простой и часто используемый для механизации работ в промышленности подъемный механизм. Широкое применение нашли электротали грузоподъемностью от 200 до 5000 кг. Как правило, в этих талях используются барабаны с одноканатной навивкой, что обеспечивает простоту конструкции, изготовления, невысокие требования к условиям эксплуатации. Такие тали просты в ремонте и обслуживании.

Мировые тенденции, направленные на сокращение ресурсов, повышение производительности, снижение количества ручного труда, обуславливают по-

явление на рынке грузоподъемных механизмов электроталей с грузоподъемностью до 30000 и даже до 70000 кг [1].

Методики расчета механизмов электроталей разработаны ещё в XX в. [2]. При применении этих методик исходными данными при расчете механизма подъема электротали являются группа классификации, грузоподъемность и высота подъема груза. При использовании механизма с одноканатной навивкой на первом шаге расчета выбирается кратность полиспаста [2, 3]. В зависимости от заданной грузоподъемности ее рекомендуется выбирать из нескольких значений. При минимальной грузоподъ-

емности 200 кг кратность полиспаста принимают не более двух. При увеличении грузоподъемности кратность полиспаста может увеличиваться, однако практика показывает, что даже при грузоподъемности 20 т кратность полиспаста может составлять также два.

Кратность полиспаста оказывает влияние на конструктивные особенности механизма подъема, а также на его массу. Снижение массы механизма подъема уменьшает эксплуатационные затраты и может значительно улучшить показатели экономичности крана [2, 3]. Проведем анализ влияния кратности полиспаста на массу механизма подъема.

Для анализа будем использовать классическую методику расчета с применением матриц, которое обеспечивает программное приложение Mathcad [6].

В качестве исходных данных примем высоту подъема груза  $H_{gr} = 10$  м, скорость подъема груза  $V_c = 0,5$  м/с, КПД механизма подъема  $\eta_n = 0,98$ , грузоподъемность  $Q$  изменяется от 100 до 10000 кг с шагом 1000 кг.

По [2, 7, 8] выбираем диаметр канатов для всех вариантов грузоподъемности. При выборе используем несколько

вариантов кратностей полиспаста  $n_k$  от 2 до 6 с шагом один.

По выбранному диаметру каната на основе [7] определяем диаметр блоков для каждой кратности полиспаста и всего ряда грузоподъемности. Объем блока крупнее находим по формуле

$$V_{bl} = \frac{3\pi \cdot D_{bl}^2 \cdot d_k}{4}, \quad (1)$$

где  $D_{bl}$  – диаметр блока, м;  $d_k$  – диаметр каната, м.

Примерную массу блоков определяем по формуле

$$m_{bl} = V_{bl} \cdot \rho \cdot N_{bl}, \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность стали,  $\rho = 7880$  кг/м<sup>3</sup>;  $N_{bl}$  – количество блоков,

$$N_{bl} = n_k - 1, \quad (3)$$

где  $n_k$  – количество канатов, на которых висит груз.

Рассчитанная масса блоков приведена на рис. 1.

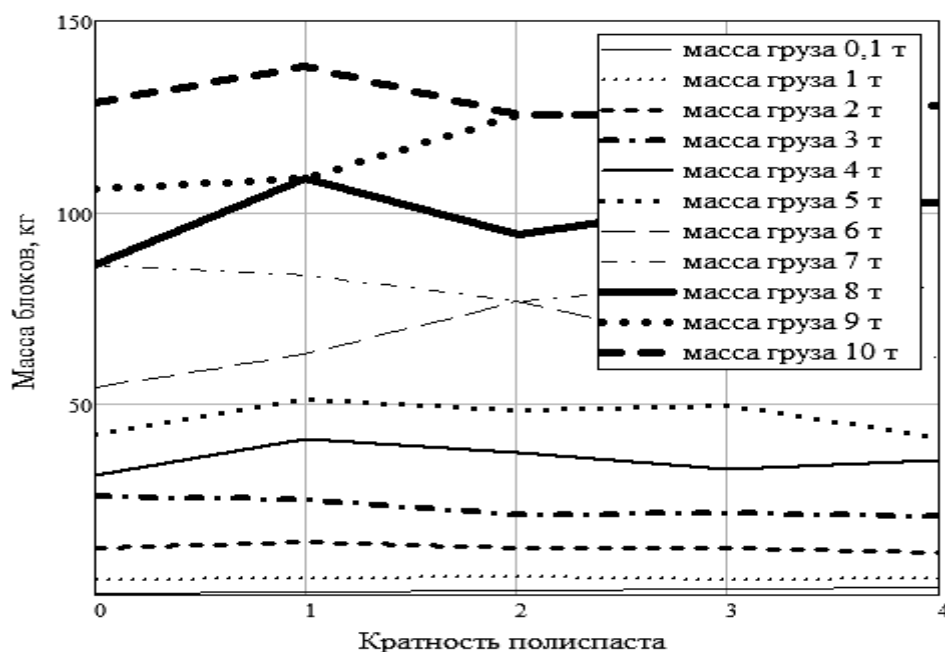


Рис. 1. Рассчитанная масса блоков в зависимости от кратности полиспаста

Как видно из рис. 1, масса блоков крюковой подвески и полиспаста увеличивается при росте массы груза и зависит от кратности полиспаста. При массе груза до 4000 кг масса блоков практически не изменяется. При массе груза свыше 4000 кг масса блоков крюковой подвески изменяется в зависимости от кратности полиспаста и рекомен-

дуемая кратность полиспаста зависит от каждого конкретного случая.

Следующим шагом является определение диаметра барабана в соответствии с [7] и его длины, а также толщины стенки на основании [2].

Масса барабана вычисляется по формуле

$$m_b = \rho \cdot \pi \cdot (D_b^2 - (D_b - S_b)^2) \cdot \frac{2,5 \cdot \frac{d_k}{1000} + \frac{318,31 \cdot \frac{d_k + 1,5}{1000} \cdot H_{gr} \cdot n_k \cdot 1000}{D_b} + 0,006}{1000}, \quad (4)$$

где  $D_b$  – диаметр барабана;  $S_b$  – толщина стенки барабана.

Толщина стенки барабана определяется по формуле

$$S_b = 0,95 \frac{1000 G_{gr}}{n_k \cdot \eta_n (d_k + 3) \sigma}, \quad (5)$$

где  $\sigma$  – допускаемые напряжения стенки барабана, для качественных конструкционных сталей принято  $\sigma = 200$  МПа.

Значения масс барабанов в зависимости от грузоподъемности и кратности полиспаста представлены на рис. 2.

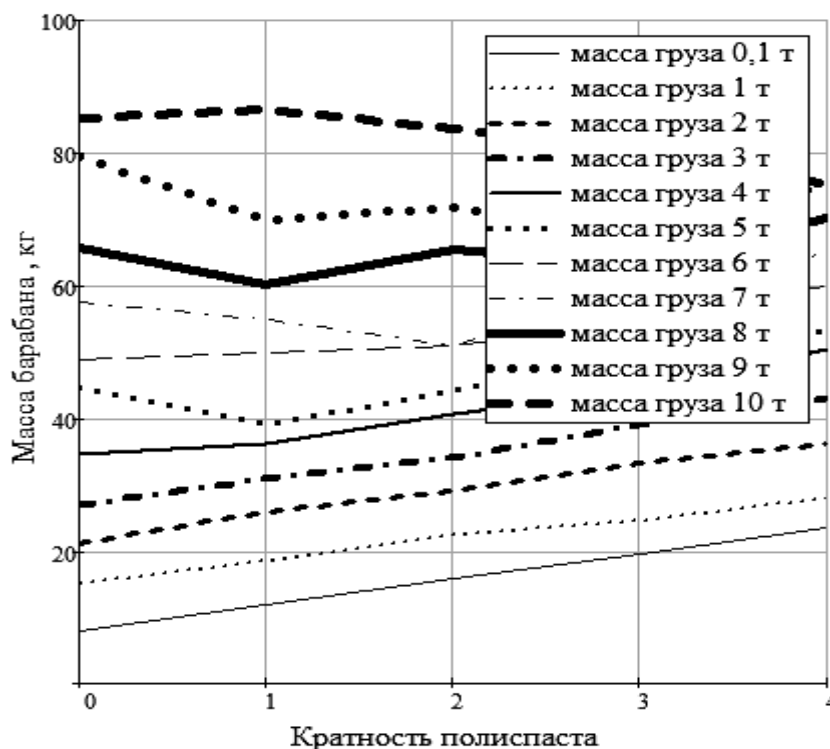


Рис. 2. Значения масс барабанов в зависимости от кратности полиспаста для принятых вариантов грузоподъемности



Массу каната можно найти по формуле

$$m_k = l_k \cdot m_{k_n}, \quad (6)$$

где  $m_{k_n}$  – погонная масса каната [8].

Из рис. 2 видно, что при грузоподъемности до 4 т масса барабана возрастает при увеличении кратности

полиспаста. При массе груза от 3 до 10 т масса барабана может снижаться при увеличении кратности полиспаста на каком-то участке и принимать минимальные значения при кратности полиспаста больше двух.

Зависимость массы каната от кратности полиспаста представлена на рис. 3.

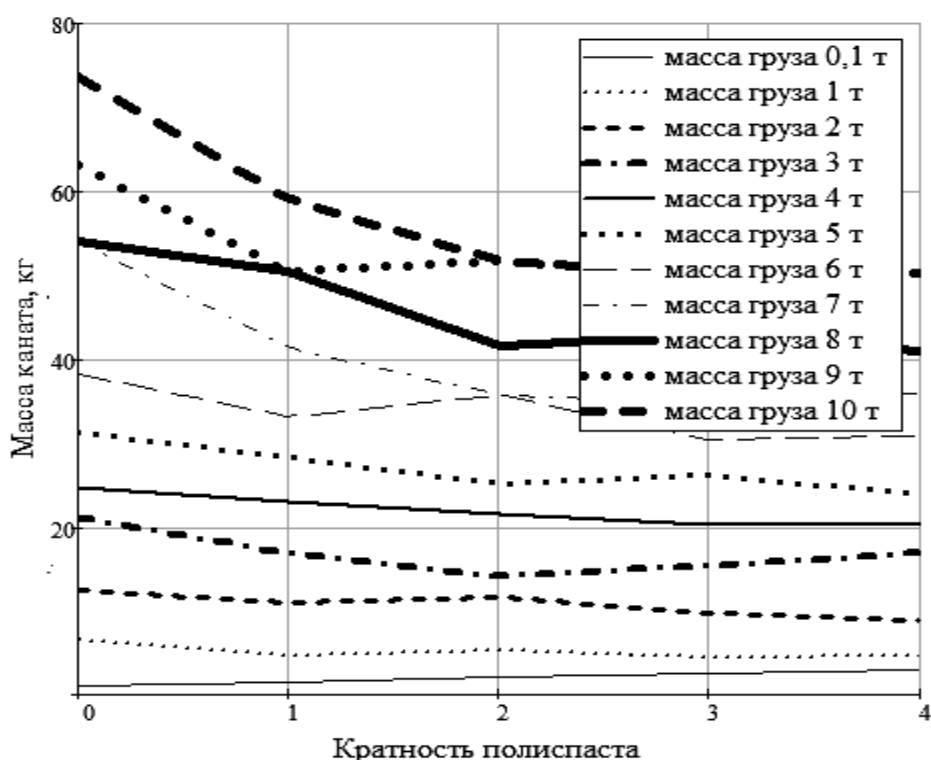


Рис. 3. Зависимость массы каната от кратности полиспаста

Из рис. 3 видно, что масса каната возрастает в зависимости от грузоподъемности на всем исследуемом диапазоне и зависит от кратности полиспаста. При грузоподъемности от 8 т и выше масса каната снижается при увеличении кратности полиспаста.

Суммарная масса механизма (масса блоков крюковой подвески и полиспаста, масса барабана и масса каната) представлена на рис. 4.

Каждому рассматриваемому случаю соответствует определенная длина каната, которую можно найти по формуле

$$l_k = H_{gr} \cdot n_k + \frac{6,28 \cdot D_{bl}}{1000} + \frac{4,71 \cdot D_{bl}}{1000} + \frac{18,84 \cdot D_b}{1000} + \frac{6 \cdot d_k}{1000}. \quad (7)$$

Из рис. 4 видно, что при массе груза до 6 т кратность полиспаста практически не оказывает влияния на массу механизма, при росте грузоподъемности до 10 т необходимо проводить оптимизационный расчет для выбора оптимальной кратности полиспаста с целью снижения массы.

При проведении оптимизационного расчета следует учитывать массу двигателя и редуктора, т. к. увеличение кратности полиспаста приводит к

уменьшению диаметра барабана и возрастанию частоты его вращения, что влечет за собой уменьшение передаточного числа и массы редуктора.

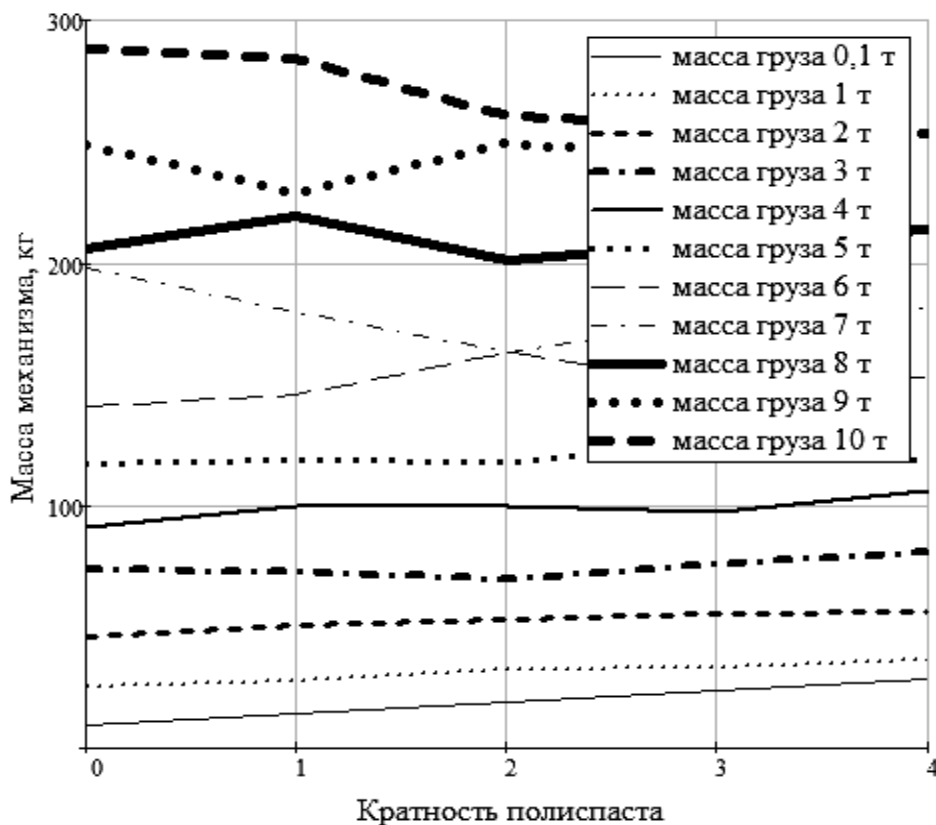


Рис. 4. Суммарная масса механизма в зависимости от кратности полиспаста

Проведем анализ масс двигателей и редукторов, которые можно использовать при проектировании электроталей исследуемых грузоподъемностей.

В качестве параметров для выбора редуктора будем использовать требуемую мощность и статический момент на барабане, который определяется по формуле

$$M_{st} = F_k \frac{D_b}{2}, \quad (8)$$

где  $F_k$  — расчетное усилие в канате.

Зависимость статического момента на барабане от кратности полиспаста для ряда исследуемых грузоподъемностей представлена на рис. 5.

Из рисунка видно, что статический момент на барабане уменьшается при росте кратности полиспаста на всем исследуемом диапазоне грузоподъемностей.

Для анализа общей массы механизма подъема применены данные о двигателях, используемых в механизме. В качестве примера взяты двигатели Пинского опытно-механического завода [9]. Для агрегатирования с двигателем и барабаном использованы данные о редукторах производства компании «Норд» (Nord) [10]. Несмотря на то, что эти редукторы не могут работать при высоких режимах эксплуатации, по сравнению с редукторами других производителей, например Bonfiglioli [11], и в связи с тем, что тали, как правило,

имеют группу режима эксплуатации не более чем А2 или А3 [7], редукторы группы Nord можно использовать в механизмах подъема.

Графики, отражающие изменение массы механизма подъема, представлены на рис. 6.

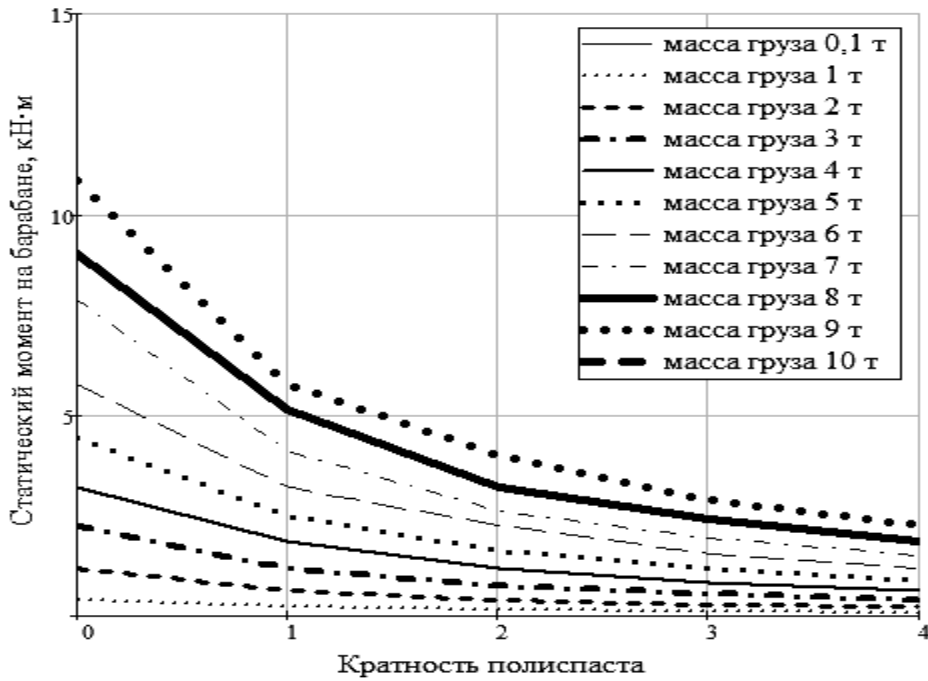


Рис. 5. Зависимость статического момента на барабане

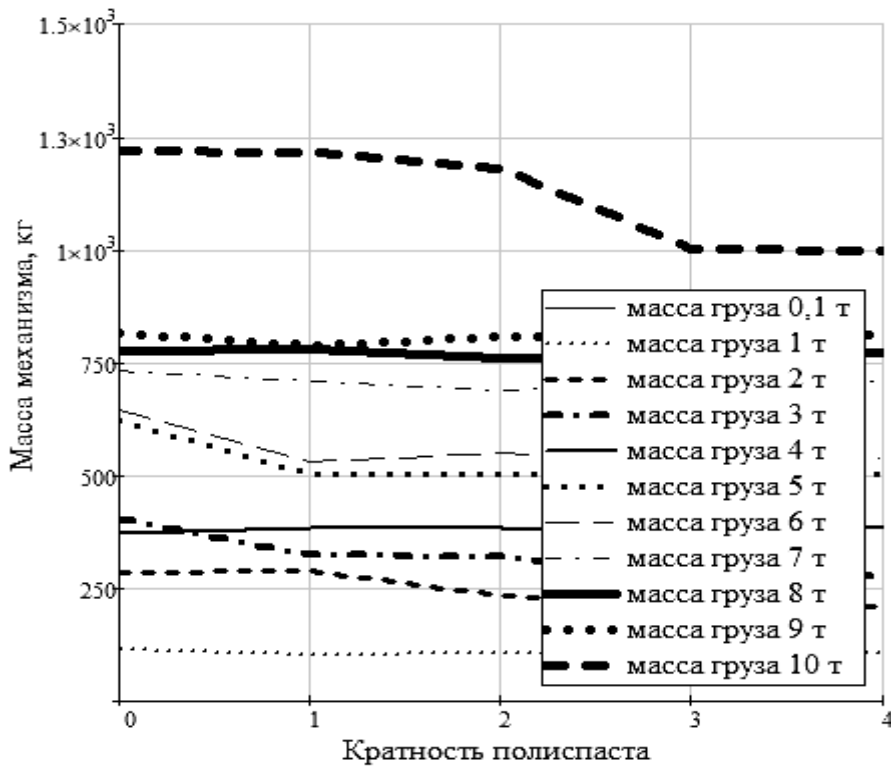


Рис. 6. Изменение полной массы механизма подъема в зависимости от кратности полиспаста

Из рис. 6 видно, что для грузоподъемностей до 10 т кратность полиспаста не оказывает существенного влияния на массу механизма подъема. Однако выбор кратности полиспаста с учетом необходимости минимизации массы может обеспечить её снижение до 16 %. Такая ситуация возникает при определении длины барабана по [2, 3]. При увеличении требуемой грузоподъемности длина барабана может достигать 2,5 м и более.

Исходя из конструктивных требований к габаритам талей, разработчики вынуждены ограничивать длину барабана каким-то значением. В этом случае, исходя из заданной длины и требуемой канатоёмкости, необходимо определить новый диаметр барабана, для чего предлагается использовать формулу

$$D_{bN} = \frac{318,31(d_k + 1,5)H_{gr} \cdot n_k}{L_{bz} - 2,5d_k - 6}, \quad (9)$$

где  $L_{bz}$  – заданная длина барабана.

Тогда новую длину барабана можно найти по формуле

$$L_{bN} = 2,5d_k + ([318,31(d_k + 1,5) \times H_{gr} \cdot n_k] / D_{bN}) + 6. \quad (10)$$

Масса механизма, включающая массу барабана, блоков и каната, определяется по вышеприведенной методике. Для высоты подъема 10 м графики массы механизма представлены на рис. 7.

По ранее рассмотренной методике определяется новый требуемый вращающий момент на барабане. Новые значения вращающего момента представлены на рис. 8.

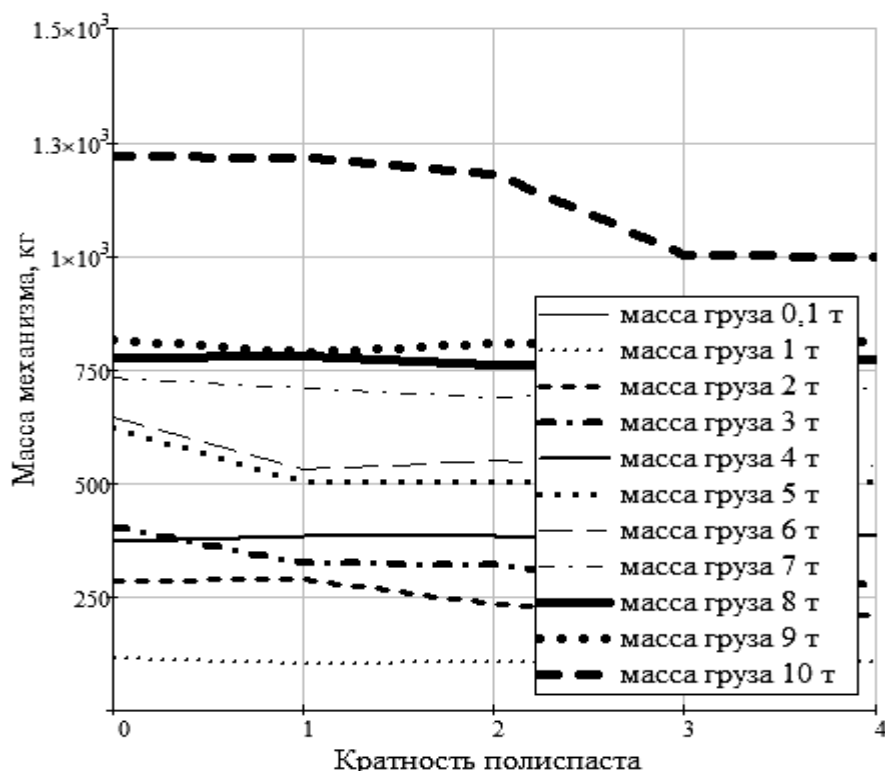


Рис. 7. Масса механизма с измененной длиной барабана

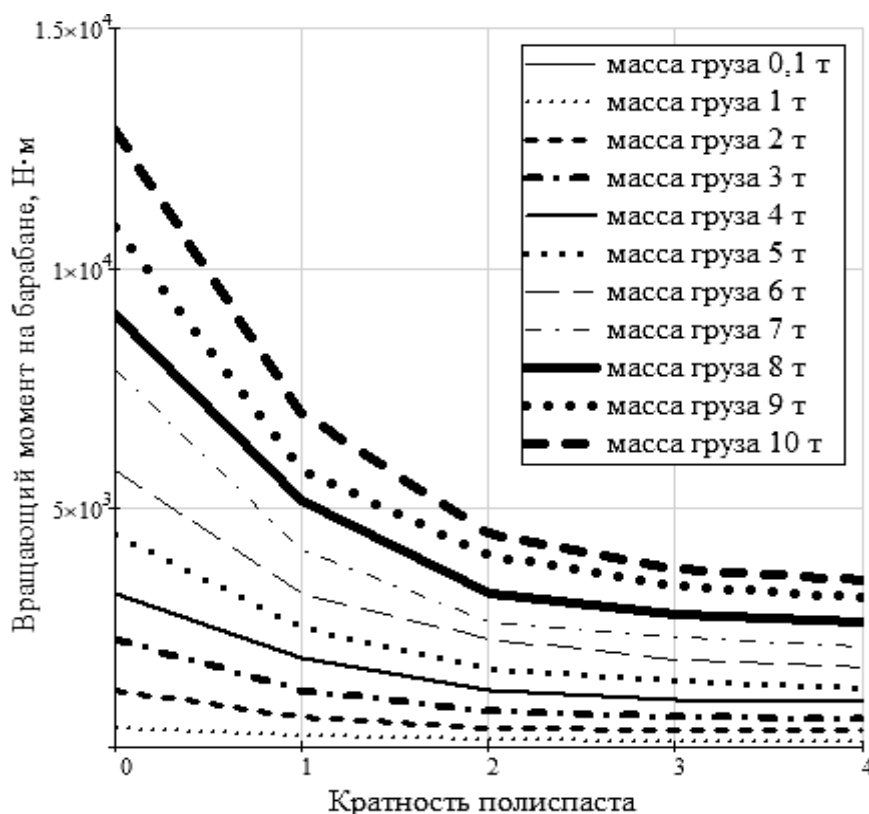


Рис. 8. Требуемый вращающий момент на барабане с откорректированной длиной

Аналогичные расчеты выполнены для талей с грузоподъемностью до 10 т и высотой подъема груза до 20 м.

Анализ результатов расчетов показывает:

– для грузоподъемности до 10 т и при высоте подъема груза до 20 м для талей с одноканатной навивкой при принятии длины барабана без корректировки наиболее выгодна с точки зрения минимизации массы кратность полиспаста, равная двум;

– при корректировке длины барабана в сторону уменьшения наиболее выгодную кратность полиспаста с точки зрения минимизации массы механизма подъема и уменьшения требуемого вращающего момента необходимо определять по вышепредлагаемой методике; для снижения требуемого вращающего момента на барабане во всех случаях необходимо увеличивать кратность полиспаста.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Торговый дом TOR [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.td-tor.com/catalog/k-4690509-tali\\_telfery](http://www.td-tor.com/catalog/k-4690509-tali_telfery). – Дата доступа 19.09.2018.
2. Справочник по кранам : в 2 т. Т. 2 : Характеристики и конструктивные схемы кранов. Крановые механизмы, их детали и узлы. Техническая эксплуатация кранов / М. П. Александров [и др.] ; под общ. ред. М. М. Гохберга. – Москва : Машиностроение, 1988. – 559 с.
3. Грузоподъемные машины : учебник для вузов по специальности «Подъемно-транспортные машины и оборудование» / М. П. Александров [и др.]. – Москва : Машиностроение, 1986. – 400 с.
4. Кобзев, Р. А. Методы оптимального проектирования козловых кранов высокого класса ответственности : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.04 / Р. А. Кобзев. – Новочеркасск, 2015. – 31 с.

5. **Лесковец, И. В.** Оптимизация параметров механизма подъема кранов мостового типа / И. В. Лесковец, А. Д. Бужинский, О. В. Леоненко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2018. – № 1 (58). – С. 36–44.
6. Образовательный математический сайт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://old.exponenta.ru>. – Дата доступа 29.09.2018.
7. Об утверждении Правил по обеспечению промышленной безопасности грузоподъемных кранов : постановление М-ва по ЧС Респ. Беларусь № 37 от 28 июня 2012 г. – Режим доступа: <https://www.pravoby.info/bel/15/618-1.htm>. – Дата доступа 29.09.2018.
8. **ГОСТ 2688-80.** Канат двойной свивки типа ЛК-Р конструкции 6x19. – Москва : Стандарт, 1980. – 9 с.
9. Пинский опытно-механический завод [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.omz.by>. – Дата доступа 16.10.2018.
10. ООО «Норд приводы» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.nord.com/cms/en/home.jsp>. – Дата доступа 16.10.2018.
11. Редукторы Bonfiglioli [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.bonfiglioli.com/en/company/bonfiglioli-today/product-brands/>. – Дата доступа: 16.10.2018.

*Статья сдана в редакцию 20 декабря 2018 года*

**Игорь Вадимович Лесковец**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.  
E-mail: [le@bru.by](mailto:le@bru.by).

**Вадим Иванович Семчен**, преподаватель, Белорусско-Российский университет.

**Анатолий Евгеньевич Науменко**, канд. техн. наук, Белорусско-Российский университет.

**Igor Vadimovich Leskovets**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.  
E-mail: [le@bru.by](mailto:le@bru.by).

**Vadzim Ivanovich Semchen**, senior lectures, Belarusian-Russian University.

**Anatoliy Evgenyevich Naumenko**, PhD (Engineering), Belarusian-Russian University.

---

---

УДК 621.81

*В. М. Пашкевич*

**ОБУЧАЕМЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СЕМАНТИЧЕСКИЕ СЕТИ  
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ**

---

UDC 621.81

*V. M. Pashkevich*

**TRAINED FUNCTIONAL SEMANTIC NETWORKS FOR MODELING  
TECHNOLOGICAL OBJECTS**

---

**Аннотация**

Рассмотрены методологические принципы построения функциональных семантических сетей, обучаемых по результатам экспериментальных исследований технологических объектов. Предложены два варианта обучения – запоминанием и обобщением. Описывается возможность преобразования функциональных семантических сетей к нейронным сетям с архитектурой «многослойный перцептрон».

**Ключевые слова:**

функциональные семантические сети; нейронные сети; метод группового учета аргументов; отношения; обучение; базисные функции.

**Abstract**

The paper considers methodological principles of constructing functional semantic networks trained according to the results of experimental studies of technological objects. Two training options are offered, which are based on memorization and generalization. The possibility of converting functional semantic networks to neural networks with the «multi-layer perceptron» architecture is described.

**Keywords:**

functional semantic networks; neural networks; group method of data handling; relations; training; basic functions.

---

***Введение***

Использование функциональных семантических сетей (ФСС) является одним из эффективных способов моделирования сложных машиностроительных объектов. Как правило, форма связи между параметрами и элементами таких объектов носит характер нелинейных функциональных зависимостей, а взаимосвязь между элементами объектов описывается сложной сетевой структурой [1].

Представление объектов машиностроения в форме ФСС позволяет обеспечить решение многих задач оптимизационного содержания, среди кото-

рых – задачи управления точностью технологических процессов, а также оптимизации массогабаритных характеристик механизмов [2]. Однако реализуется такой подход успешно лишь тогда, когда отношения, описывающие ФСС, уже были построены ранее и статично представлены в базе знаний математического процессора, ответственного за механизм вывода (поиска решения) семантической сетью.

В то же время зависимости между параметрами отношений ФСС часто носят статистический характер, а определяться и корректироваться они должны в процессе функционирования механизма вывода, т. е. на основе нерегу-

лярно поступающих эмпирических данных. Таким образом, обучаемый тип ФСС должен обладать способностью к обобщению эмпирических данных и построению соответствующей зависимости. При этом эмпирические данные могут быть расцениваемы в качестве обучающего множества для механизма вывода, а процедура автоматического формирования отношений ФСС – как процедура ее обучения.

Описываются методологические принципы построения обучающихся ФСС, которые не требуют использования априорной информации о структуре их отношений, а также обеспечивают минимизацию и упрощение структуры аппроксимирующих зависимостей.

### Основная часть

Принципиально могут быть предложены два варианта обучения ФСС по предъявляемым образцам, классифицируемые литературой как обучение запоминанием и обучение обобщением [3].

Преимуществом **обучения запоминанием** является отсутствие необходимости использования априорной информации о форме зависимости. Построение зависимости в этом случае ведется в неявном виде путем решения задачи о многомерной интерполяции, или триангуляции данных, размещенных в факторном пространстве задачи.

Очевидно, что для таких наблюдений, являющихся многомерными точками  $(x_1; x_2; x_3 \dots x_n; y)$  факторного пространства, может быть использована сложная аппроксимирующая функция

$$y = f(x_1; x_2; x_3 \dots x_n), \quad (1)$$

выступающая композицией функций вида

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n. \quad (2)$$

При этом зависимости (2) могут быть построены для каждой области аргументов  $x_1; x_2; x_3 \dots x_n$ , в которой с

заранее выбранной погрешностью выражение (1) может быть приближено линейной зависимостью (2). Следовательно, предлагаемый алгоритм представляет собой кусочно-линейную аппроксимацию нелинейной зависимости в многомерном пространстве.

Теорема Колмогорова об аппроксимации доказывает возможность такого приближения [4]. В соответствии с этой теоремой функция нескольких аргументов может быть приближена суммой, произведением или суперпозицией функций одного аргумента. Отметим также, что этот же принцип лежит в основе функционирования нейронных сетей, построенных по архитектуре «многослойный перцептрон», и в основе аппроксимации сложных зависимостей на базе метода группового учета аргументов (МГУА) [5].

Для реализации обучения запоминанием может быть предложен следующий алгоритм. Набор приближающих функций (2) строится последовательно, образуя при этом в многомерном пространстве набор выпуклых базовых элементов – гипертреугольников, построенных по  $n$  экспериментальным точкам, принадлежащим  $n$ -мерному факторному пространству. Указанный набор функций с поступлением новых наблюдений корректируется с целью создания набора гиперплоскостей, кусочно (в форме нерегулярной «черепицы») покрывающих нелинейную поверхность (1). При добавлении новых наблюдений обеспечивается построение «покрытия» поверхности (1) без каких-либо пропусков, если новый образец существенно отклоняется от уже построенных ранее базовых элементов.

Таким образом, алгоритм может быть описан следующей последовательностью действий, которые легко реализуются методами вычислительной геометрии:

1) провести серию наблюдений для построения первого базового элемента в факторном пространстве обучающих данных и включить соответ-



ствующие ему точки в базу обучающих образцов;

2) провести новое наблюдение;

3) проверить условие попадания нового наблюдения в область, ограниченную набором базовых элементов;

4) если наблюдение выходит за пределы области набора базовых элементов, добавить его в базу обучающих образцов и сформировать новую совокупность базовых элементов, расширяя, таким образом, область покрытия функции (1);

5) перейти к п. 2 алгоритма;

6) если наблюдение попадает в область набора базовых элементов, провести оценку адекватности базы обучающих образцов новому наблюдению;

7) если база обучающих образцов адекватна новому наблюдению, исключить его из рассмотрения;

8) перейти к п. 2 алгоритма;

9) если база обучающих образцов неадекватна новому наблюдению, включить его в базу и провести ее локальное разбиение на новые базовые элементы с учетом этого наблюдения;

10) перейти к п. 2 алгоритма и т. д. до обработки всей совокупности поступающих данных.

Описанный алгоритм не предъявляет каких-либо специфических требований к виду модели (1), размеру области ее построения, количеству ее аргументов, т. е. характеризуется определенной универсальностью.

Несмотря на свою внешнюю трудоемкость, алгоритм работает с линейными зависимостями и поэтому обеспечивает достаточно высокую скорость работы. При корректировке «покрытия» поверхности отклика на каждом этапе корректируется всего лишь один ее базовый элемент, остальные при этом остаются неизменными. Таким образом, при поступлении новых наблюдений глобальный пересчет модели не требуется, а реализуется только локальная процедура ее уточнения.

Недостатком метода может стать

его относительно низкая точность, особенно при малом объеме обучающих данных (когда факторное пространство слабо заполнено множеством обучающих образов). Однако подобный же недостаток присущ любым методам аппроксимации многомерных данных.

Другим недостатком может стать относительно слабая экстраполяционная способность метода. Это связано с тем, что решение задач экстраполяции проводится только с учетом локальной геометрии аппроксимирующей функций (2), приближенных линейными гиперплоскостями.

**Обучение обобщением** имеет лучшие показатели в части экстраполяции обучающих данных за пределы их множества. Однако, как правило, в большинстве известных методов вид обобщающей зависимости должен быть определен исследователем заранее.

В то же время следует отметить, что даже при построении аппроксимирующей зависимости в неявном виде, например при использовании нейросетевой модели, структура обучаемой системы должна быть также определена заранее. Так, например, у многослойных перцептронов должны быть определены количества нейронов в каждом слое, а также количество слоев нейронной сети, что может приводить к избыточному усложнению ее архитектуры применительно к решению поставленной задачи.

Указанного ограничения лишена адаптивная процедура построения моделей на основе алгоритма, имеющего определенное родство с МГУА [5]. Метод базируется на адаптивном подборе аппроксимирующей зависимости.

Предлагаемая реализация метода сводит задачу аппроксимации сложной функции к ее построению с использованием набора базисных функций (отношений). Для большинства задач технологического содержания, например, опирающихся на применение эмпирических формул теории резания, чаще все-

го достаточно использования отношений в полиномиальной форме

$$y - \sum_{n=0}^{n=k} a_n x^n = 0 \quad (3)$$

или показательной

$$y - A_0 \prod_{n=1}^{n=k} x_n^{A_n} = 0. \quad (4)$$

На основе указанных базисных функций последовательно рассматриваются варианты моделей – сначала с участием отдельных переменных отношений, а затем и с их парами, тройками и т. д. В качестве критерия качества модели может использоваться величина остаточной суммы квадратов или, например, величина коэффициента детерминации. Полученные на первом этапе модели могут использоваться как аргументы для второго этапа и т. д.

Значения коэффициентов  $a_n$  или  $A_n$  для любого из строящихся отношений в общем случае могут быть найдены на основе решения соответствующих уравнений, например, с применением метода наименьших квадратов.

Очевидно, что описанный способ обеспечивает эффективное обучение только в части выбранного отношения, не обеспечивая при этом построение всей системы отношений в целом. Поэтому использование метода наименьших квадратов применительно к построению всей совокупности отношений ФСС оказывается невозможным.

Алгоритм, базирующийся на процедуре обучения ФСС, может быть использован в качестве альтернативного описанному. При этом начальные значения коэффициентов  $a_n$  и  $A_n$  иницируются в пределах малых (близких к нулю) случайных знакопеременных чисел. На первом этапе подсчитывается общая невязка выходов сети по формуле

$$S = \sum_{i=1}^{i=n} \varepsilon_i^2, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_i$  – невязка  $i$ -го отношения,  $\varepsilon_i = y_i - f(x_1; x_2; x_3 \dots x_n)$ .

Для линейных базисных функций вида (2) процесс обучения значения коэффициентов  $a_n$  и  $A_n$  может быть основан на использовании дельта-правила Видроу – Хоффа [7]:

$$A_n^{k+1} = A_n^k + \eta \cdot \varepsilon_i, \quad (6)$$

где  $A_n^k$  – значение коэффициента  $A_n$  на  $k$ -м шаге обучения;  $\eta$  – небольшое положительное число (норма обучения).

Остановка обучения производится при стабилизации величины общей невязки сети  $S$ . Для оценки качества обучения ФСС может, как и при обучении нейронных сетей, использоваться кросс-проверка (процессы обучения и проверки ведутся на различных множествах образцов из исходного обучающего множества примеров).

На практике выбор одного из двух описанных вариантов обучения в значительной мере зависит как от размерности отношения ФСС (количества его переменных), так и объема обучающих данных. Очевидно, что при большой размерности отношений алгоритм, базирующийся на запоминании образцов и интерполяции данных, будет эффективнее метода построения аппроксимирующей зависимости, так как количество возможных комбинаций переменных этой зависимости будет велико и для выбора подходящей комбинации может потребоваться значительное время обучения. При небольшой размерности отношения более эффективным может оказаться, например, построение аппроксимирующей зависимости на основе метода наименьших квадратов, который не потребует хранения в базе знаний системы большого набора обучаю-

ших данных, т. е. будет менее расточителен в части ее памяти.

С учетом вышепредставленных особенностей обучения ФСС следует отметить также ряд признаков, свидетельствующих о принципиальном родстве методов и принципов, лежащих в основе функционирования обучающихся ФСС и нейронных сетей.

Функционирование нейрона может быть упрощенно сведено к преобразованию сигналов на его входах в сигнал на выходе. Так, например, в случае использования модели нейрона Мак-Каллока – Питтса, его выходной сигнал образуется путем применения сжимающего преобразования (например, с помощью сигмоидальной пороговой функции или функции гиперболического тангенса) взвешенной суммы входов нейрона [7].

В то же время любая функция или, соответственно, ориентированный граф, описывающий произвольное отношение ФСС, также осуществляют указанное преобразование входных сигналов в выходные. Однако в случае ФСС ее отношения имеют, как правило, более сложный вид, чем линейное суммирование входов сети и его преобразование с помощью пороговой функции активации. В этой связи ФСС, представленная ориентированным графом (т. е. «настроенная» на решение конкретной задачи), может быть в этом смысле интерпретирована как нейронная сеть, имеющая нерегулярную архитектуру, т. е. как сеть, состоящая из набора нейронов, каждый из которых имеет произвольное число входов и обладает также произвольной функцией его активации.

Для нейронных сетей подобной структуры, не имеющих такого послойного построения, как, например, у сетей архитектуры «многослойный персептрон», в настоящее время отсутствуют эффективные алгоритмы обучения. Популярный алгоритм обратного распространения ошибки требует именно ука-

занной архитектуры, а также использования сигмоидальной функции активации, а не, например, пороговой функции.

Теоретически, если ограничиться набором ортогональных функций активации, линейных по параметрам (например, в форме взвешенных линейных сумм входов, полиномов  $n$ -й степени или степенных зависимостей), то с помощью преобразования переменных такие функции могут быть сведены к линейным и, следовательно, ФСС может быть редуцирована до нейронной сети архитектуры «многослойный персептрон».

Ввиду этого перспективным подходом к решению задачи обучения ФСС является снижение их сложности за счет процедуры декомпозиции отдельных отношений. Такой подход может быть связан с линеаризацией зависимости, лежащей в основе отношения, что позволяет для его построения применять аналитические методы, например, базирующиеся на использовании классического метода наименьших квадратов.

Пусть, например, необходимо построить отношение сети, соответствующее эмпирической модели допускаемой скорости резания фрезы  $V$ , м/мин, при постоянной стойкости и различных значениях подачи  $s$ , мм/мин, и глубины резания  $t$ , мм, в показательной форме

$$\hat{V} = a_0 t^{a_1} s^{a_2}. \quad (7)$$

На рис. 1 отображен фрагмент семантической сети с отношением

$$\hat{V} - a_0 t^{a_1} s^{a_2} = 0, \quad (8)$$

соответствующим эмпирической модели (1).

Приведем ее к линейному виду путем логарифмирования:

$$\ln \hat{V} = \ln a_0 + a_1 \ln t + a_2 \ln s. \quad (9)$$

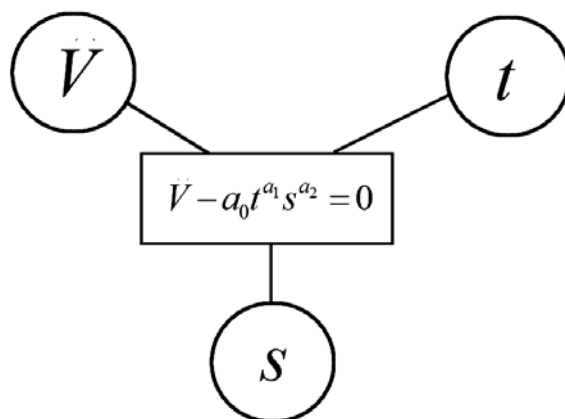


Рис. 1. Фрагмент семантической сети, соответствующий эмпирической показательной модели

Эта модель соответствует линейному выражению

$$\hat{Y} = A_0 + A_1 X_1 + A_2 X_2, \quad (10)$$

где  $\hat{Y} = \ln \hat{V}$ ;  $X_1 = \ln t$ ;  $X_2 = \ln s$ ;

$A_0 = \ln a_0$ ;  $A_1 = a_1$ ;  $A_2 = a_2$ .

Очевидно, что таким образом

ФСС, представленная на рис. 1, может быть декомпозирована на набор отношений (рис. 2), содержащих элементарные или линейные функции, эмпирические коэффициенты для которых могут быть легко найдены аналитически, например, на основе того же метода наименьших квадратов.

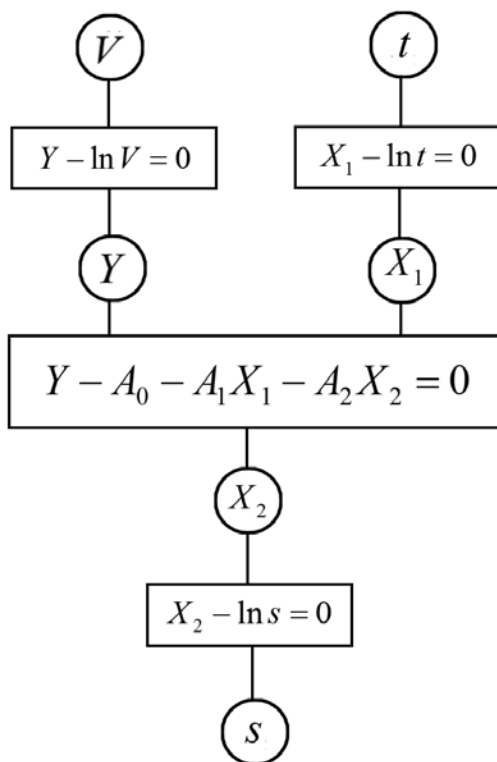


Рис. 2. Результат декомпозиции сложного отношения сети на набор элементарных отношений

Описанный подход расширяет возможности моделей, базирующихся на обучаемых ФСС, позволяет применять для их построения методы, разработанные для технологий нейронных сетей.

### **Заключение**

Рассмотренные принципы обучения ФСС позволяют сформулировать ряд выводов, полезных для практики моделирования технологических систем.

1. Для обучения ФСС могут быть использованы два принципиально различных подхода – на основе алгоритмов обучения запоминанием и обучения обобщением. Алгоритмы обладают специфическими достоинствами и недостатками, поэтому их применение должно учитывать два основных свойства данных – их размерность и объем.

2. Эффективным способом обучения компьютерных систем на основе ФСС является алгоритм обучения, использующий для построения модели поверхности отклика МГУА. При этом

для построения таких моделей следует рекомендовать набор базисных линейных или показательных функций. Это позволяет затем линеаризовать отношения ФСС (провести их декомпозицию), что открывает возможность упрощения процедуры обучения.

3. ФСС, ориентированные на решение конкретных задач, с точки зрения их архитектуры могут быть преобразованы в форму нейронных сетей, имеющих нерегулярную структуру и произвольные функции активации нейронов. При использовании для построения отношений ФСС линейных или показательных базисных функций такие нейронные сети могут быть преобразованы к линейному виду (архитектурам, сходным с многослойными персептронами).

Данное обстоятельство позволяет использовать для работы с ФСС методы, применяемые при работе с нейронными сетями, – например, алгоритм обучения на основе обратного распространения ошибки, дельта-правила Видроу – Хоффа и т. п.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Пашкевич, В. М.** Функциональные семантические сети для обеспечения точности механической обработки : монография / В. М. Пашкевич, М. Н. Миронова. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2015. – 210 с.
2. **Pashkevich, V. M.** Solution of optimization problems in mechanical engineering based on use of functional semantic networks [Electronic resource] / V. M. Pashkevich // *Advances in Engineering Research*, volume 158. International Conference on Aviaemechanical Engineering and Transport (AviaENT 2018). – Atlantis Press Publishing, 2018. – P. 319–322. – Режим доступа: <https://download.atlantis-press.com/article/25901650.pdf>. – Дата доступа: 19.12.2018.
3. **Таундсенд, К.** Проектирование и программная реализация экспертных систем на персональных ЭВМ / К. Таундсенд, Д. Фохт. – Москва : Финансы и статистика, 1990. – 320 с.
4. **Рассел, С.** Искусственный интеллект. Современный подход : пер. с англ. / С. Рассел, П. Норвиг. – Москва : Вильямс, 2006. – 1408 с.
5. **Ивахненко, А. Г.** Помехоустойчивость моделирования / А. Г. Ивахненко, В. С. Степашко. – Киев : Наукова думка, 1985. – 216 с.
6. **Пашкевич, В. М.** Концепция обучающихся функциональных семантических сетей / В. М. Пашкевич // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф.* – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2018. – С. 48–49.
7. **Осовский, С.** Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский. – Москва : Финансы и статистика, 2004. – 344 с.

*Статья сдана в редакцию 20 декабря 2018 года*

**Виктор Михайлович Пашкевич**, д-р техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.  
E-mail: [pvm@bk.ru](mailto:pvm@bk.ru).

**Viktor Mikhailovich Pashkevich**, DSc (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.  
E-mail: [pvm@bk.ru](mailto:pvm@bk.ru).

---

УДК 621.9

*Д. М. Свирепа, А. С. Семёнова, С. А. Сухоцкий*

---

**КОНСТРУКЦИИ ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ СОВМЕЩЕННОЙ ОБРАБОТКИ  
РЕЗАНИЕМ И ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ  
ДЕФОРМИРОВАНИЕМ МАГНИТНО-ДИНАМИЧЕСКИМИ РАСКАТНИКАМИ**

---

UDC 621.9

*D. M. Svirepa, A. S. Siamionava, S. A. Sukhotskiy*

---

**DESIGNS OF TOOLS FOR COMBINED PROCESSING BY CUTTING AND  
SURFACE PLASTIC DEFORMATION WITH MAGNETO-DYNAMIC ROLLERS**

---

**Аннотация**

Отличительной особенностью инструментов для совмещенной обработки резанием и магнитно-динамического раскатывания является их способность выполнять растачивание или абразивную обработку и раскатывание за один рабочий ход инструмента.

Использование этих инструментов позволяет значительно сократить время обработки заготовки за счет объединения двух операций технологического процесса в одну, что приводит к повышению производительности.

**Ключевые слова:**

упрочнение, раскатывание, совмещенная обработка, производительность.

**Abstract**

A distinctive feature of the tools for combined machining and magneto-dynamic rolling is their ability to perform boring or abrasive processing and rolling in one pass.

The use of these tools can significantly reduce the process time of a workpiece by combining the two operations of the technological process in one, which leads to increasing productivity.

**Keywords:**

hardening, rolling, combined machining, productive capacity.

---

**Введение**

Детали, рабочей поверхностью которых является внутренняя цилиндрическая поверхность, широко используются во многих отраслях промышленности (отверстия корпусных деталей, цилиндры, гильзы двигателей внутреннего сгорания, пневмо- и гидроцилиндры, втулки, ответственные внутренние поверхности труб, кольца подшипников). Для перечисленных деталей предъявляются высокие требования к качественным показателям рабочих поверхностей.

Для повышения качественных характеристик данного типа деталей широко применяются методы упрочнения поверхностным пластическим деформированием (ППД). Одним из таких методов обработки отверстий является магнитно-динамическое раскатывание [1–8]. Магнитно-динамическое раскатывание позволяет при сравнительно низких производственных затратах уменьшить шероховатость, повысить сопротивление разрушению деталей, работающих в условиях переменных нагрузок или подвергающихся истиранию, и микротвердость

поверхностного слоя металла, сформировать напряжения сжатия и необходимый микрорельеф, а также повысить износостойкость и контактную жесткость деталей машин.

Методы ППД известны на производстве, однако их широкому внедрению зачастую мешает введение дополнительной отделочно-упрочняющей операции в технологический процесс.

В настоящее время решить данную проблему помогут перспективные и экономичные способы получения качественной поверхности детали при повышении производительности обработки, сочетающие две операции технологического процесса, такие как растачивание, развертывание, абразивная обработка и раскатывание за одну технологическую операцию. С этой целью были разработаны инструменты совмещенной обработки.

Магнитно-динамическое раскатывание (МДР) можно осуществлять как после абразивной обработки, так и после лезвийной. Таким образом, можно выделить схемы совмещенной обработки, состоящие из следующих модулей: шлифование и магнитно-динамическое раскатывание, хонингование и МДР, развертывание и МДР, растачивание и МДР. При этом обработку можно производить на сверлильных, фрезерных, токарных, шлифовальных и других станках.

Важной задачей при проектировании инструментов для совмещенной обработки является решение проблемы отвода стружки, образованной от прохода первого инструмента. В ходе разработки компоновки конструкции или схемы компоновки совмещенной обработки необходимо учитывать частоты вращения модулей инструмента.

### **Инструмент для совмещенной обработки шлифованием и магнитно-динамическим раскатыванием**

Совмещенный инструмент для чистой обработки внутренних поверхностей включает в себя два модуля: шлифовальный и отделочно-упрочняющий, установленные соосно друг другу. Шлифовальный модуль состоит из шлифовального круга 2, закрепленного на оправке 1 с помощью шайбы 9 и гайки 10. Отделочно-упрочняющий включает диск 3 и магнитную обойму 6, образующие кольцевую камеру 8, в которой свободно расположены деформирующие шары 4. В магнитной обойме 6 размещены цилиндрические постоянные магниты 5. Крышка 7 препятствует выпадению источников магнитного поля 5 из обоймы 6. При вращении инструмента шлифовальный модуль осуществляет абразивную обработку детали согласно схеме внутреннего шлифования, при этом в отделочно-упрочняющем модуле деформирующие шары 4 разгоняются в кольцевой камере 8 под воздействием магнитной силы, формируемой источниками магнитного поля 5, и центробежной силы, осуществляя отделочно-упрочняющую обработку детали. В ходе обработки отвод мелкой стружки и продуктов износа абразивного инструмента производится благодаря обильному поливу зоны шлифования смазочно-охлаждающей жидкостью, что препятствует попаданию элементов износа и стружки в зону деформирования.

На рис. 1 схематично представлен инструмент для совмещенной обработки шлифованием и магнитно-динамическим раскатыванием.

Совмещенная обработка (шлифование и раскатывание) обеспечивает высокую точность геометрической формы деталей и другие качественные характеристики поверхностного слоя обрабатываемых деталей.

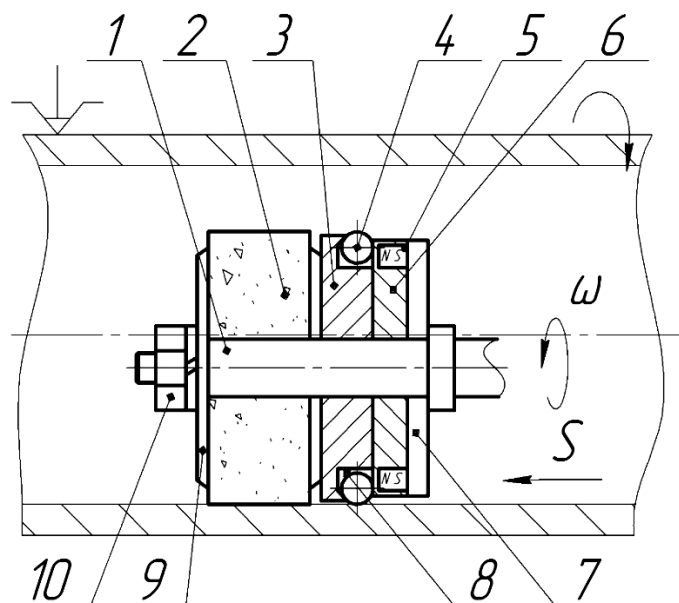


Рис. 1. Схема совмещенной обработки шлифовальным кругом и МДР

### **Инструмент для совмещенной обработки хонингованием и магнитно-динамическим раскатыванием**

Для достижения высокой точности и заданного качества внутренних поверхностей деталей широко используется хонингование, позволяющее обрабатывать тонкостенные отверстия больших диаметров. Увеличение площади контакта хона с поверхностью заготовки и уменьшение удельного давления обеспечивает высокую точность геометрической формы и приводит к повышению производительности, а снижение тепловыделения предотвращает появление в поверхностном слое микротрещин, прижогов, а также остаточных напряжений растяжения, как при шлифовании.

На рис. 2 представлена схема совмещенного инструмента хона и раскатника, содержащего хонинговальную головку 1 с абразивными брусками 2. Отделочно-упрочняющий модуль инструмента для совмещенной обработки хонингованием и магнитно-динамическим раскатыванием описан ранее в инстру-

менте для совмещенной обработки шлифованием и МДР.

При совмещении двух процессов – хонингования и раскатывания – происходит затруднение удаления микростружки, образованной в результате хонингования, и элементов износа абразивных брусков от зоны поверхностного пластического деформирования ввиду возвратно-поступательного движения инструмента. Фетровая втулка 9 служит для предотвращения попадания вышеназванных частиц в зону деформирования.

Для осуществления процесса совмещенной обработки используются режимы, характерные для хонингования на больших скоростях (80...100 м/мин), применяемые для снятия большого припуска. При данных скоростях деформирования шары разгоняются в кольцевой камере, осуществляя процесс магнитно-динамического раскатывания, при котором острые вершины хонинговальной сетки сглаживаются, положительно влияя на шероховатость поверхности и продление срока службы изделия и его элементов.

Данные совмещенные инструменты до настоящего времени не получили ши-



рокого распространения и чаще применяются хонингование как дополнительную

операцию технологического процесса.

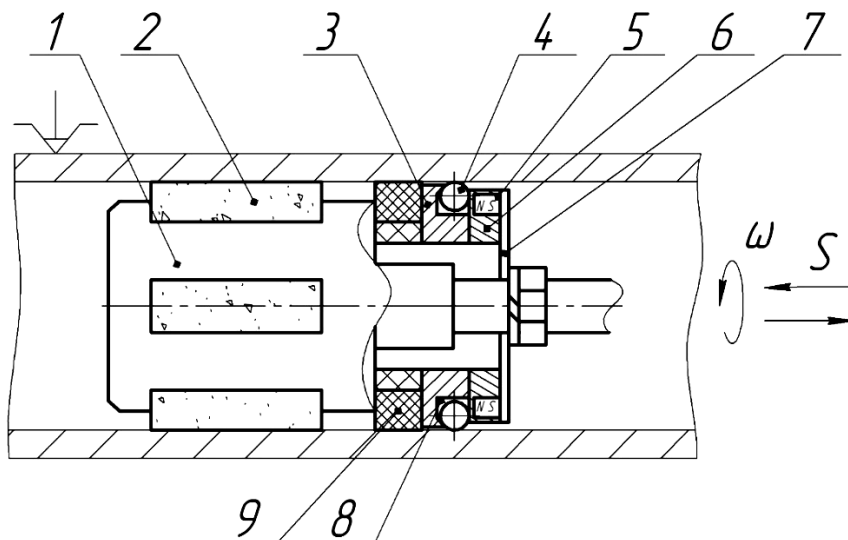


Рис. 2. Схема совмещенной обработки хонем и МДР

**Инструмент для совмещенной обработки развертыванием и магнитно-динамическим раскатыванием**

Развертывание отверстий применяется для чистовой обработки на станках токарной, сверлильной или фрезерной группы с обеспечением точности 7–9 квалитетов и шероховатости поверхности 7–8 классов. На рис. 3 пред-

ставлена схема совмещенного инструмента, включающего модуль для развертывания отверстий и модуль для отделочно-упрочняющей обработки – МДР. Согласно схеме: 1 – насадная развертка; 2 – втулка; 3 – металлическая щетка; 4 – фетровая втулка; 5 – диск; 6 – гайка; 7 – втулка; 8 – цилиндрические постоянные магниты; 9 – магнитная обойма; 10 – деформирующие шары.

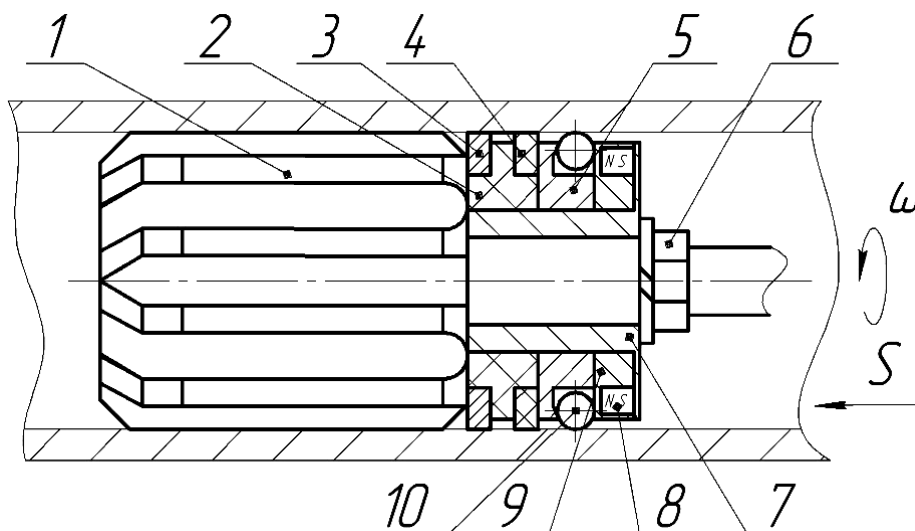


Рис. 3. Схема совмещенной обработки разверткой и МДР

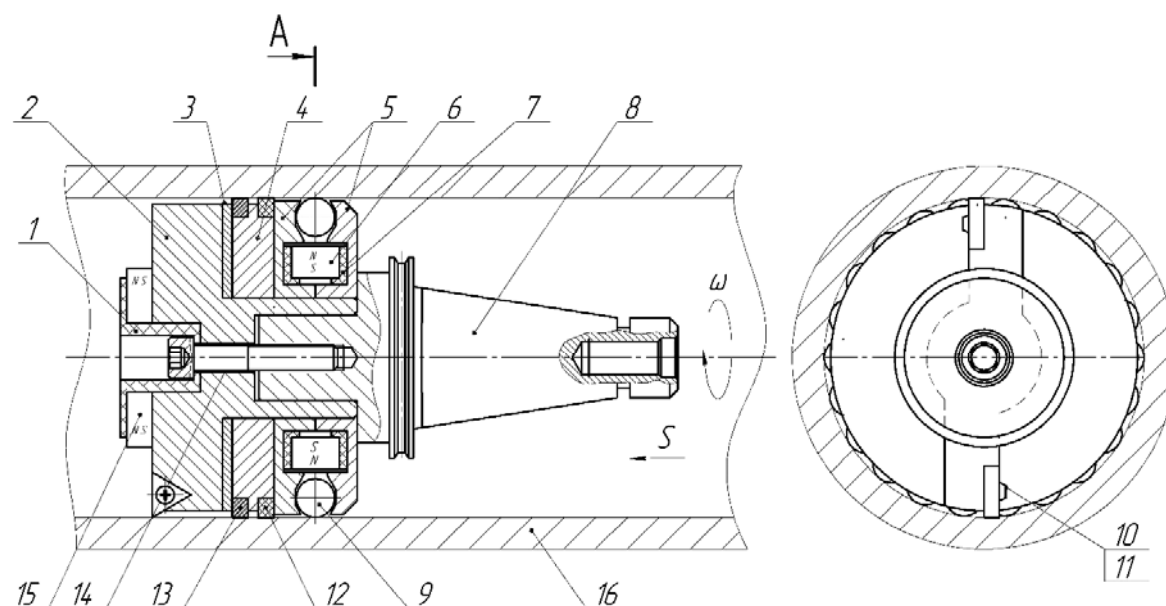
**Инструмент для совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим раскатыванием для станков фрезерно-расточной группы**

Инструмент для совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим раскатыванием применяют для увеличения диаметров цилиндрических отверстий растачиванием с последую-

щим раскатыванием с целью повышения их точности и чистоты поверхности, получения отверстий необходимой геометрической формы.

Инструмент предназначен для использования на станках фрезерно-расточной группы с ЧПУ и ручным управлением. На рис. 4 представлена конструкция инструмента для совмещенной обработки.

а)



б)

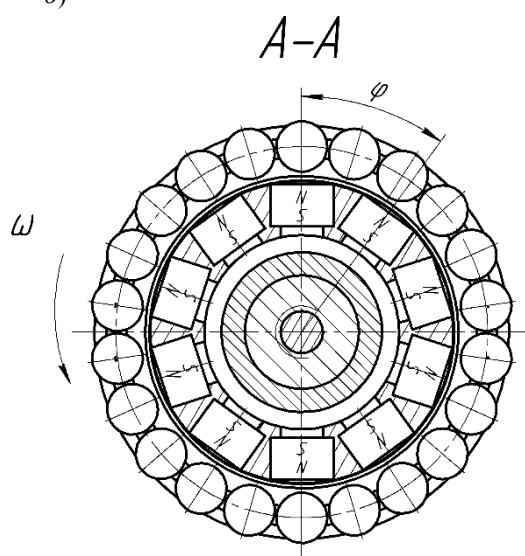


Рис. 4. Конструкция инструмента для совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим раскатыванием: а – общий вид; б – поперечное сечение инструмента

Представленная схема инструмента для совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим раскатыванием содержит следующие элементы: 1 – стакан; 2 – расточная головка; 3 – уплотняющее кольцо; 4 – втулка; 5 – диски; 6 – источники магнитного поля; 7 – обойма; 8 – фрезерная оправка; 9 – деформирующие элементы; 10 – режущая пластина; 11 – винт; 12 – фетровая втулка; 13 – щётка; 14 – винт; 15 – кольцевой магнит; 16 – деталь.

Представленный инструмент осуществляет чистовую отделочно-упрочняющую обработку отверстий деталей с полями допуска по 6–9 квалитетам с обеспечением параметра шероховатости обработанной поверхности  $Ra = 2,5 \dots 0,32$  мкм.

Для осуществления процесса раскатывания требуется, чтобы величина центробежной силы, зависящей от окружной скорости деформирующих шаров, не была меньше магнитной силы, действующей со стороны постоянных магнитов. Данное условие выполнимо при скоростном растачивании со скоростями от 250 до 500 м/мин.

Для работы инструмента оправку 8 закрепляют в шпинделе станка фрезерно-расточной группы соосно с деталью 16, сообщая последнему вращательное движение с угловой скоростью  $\omega$ , а установленной на столе станка детали 16 осевую подачу  $S$ .

Сменные режущие пластины 10 (твердосплавные или керамические) крепятся с помощью винта 11 и предварительно подводятся к торцу детали 16 на величину снимаемого припуска  $t$  при тонком растачивании.

При обработке образующаяся в процессе тонкого растачивания стружка отводится от зоны деформирования благодаря наличию постоянного опережающего кольцевого магнита 15. Стакан 1 поджимается винтом 14 и препятствует выпадению дополнительного источника магнитного поля 15. Металлическая

щётка 13, зафиксированная на диске 4, служит для препятствия попадания твердых частиц металла, образуемых при растачивании, в зону деформирования, а втулка 3, предварительно пропитанная индустриальным маслом, смазывает внутреннюю цилиндрическую поверхность отверстия перед ППД.

Источники магнитного поля – постоянные цилиндрические магниты 6 установлены в радиальных отверстиях обоймы 7 с равномерным угловым шагом  $\varphi$  без чередования полюсов, что увеличивает влияние общей магнитной составляющей на деформирующие элементы 9, находящиеся в кольцевой камере, образованной дисками 5. Таким образом, деформирующие шары 9 испытывают влияние магнитной и центробежной сил, приобретают высокую динамическую активность, перемещаются в окружном направлении кольцевой камеры, попеременно воздействуя на поверхность детали. Выполнение обработки при подачах до 200 мм/мин обеспечивает равномерное перекрытие, сглаживая острые вершины лунок, образованные деформирующим шаром после соприкосновения с деталью, тем самым формируя лунчатообразный маслоудерживающий рельеф на обработанной поверхности.

Таким образом, процесс совмещенного растачивания с последующим магнитно-динамическим раскатыванием формирует поверхностный слой с высокими эксплуатационными характеристиками [9–13].

Конструкция инструмента для совмещенной обработки резанием и МДР с осевой намагниченностью представлена на рис. 5. Инструмент содержит расточную головку 1, режущие пластины 2, опорное кольцо 3, щётку 4, фетровую втулку 5, немагнитопроводный диск 6, немагнитопроводную обойму 7, источники магнитного поля 8, шайбу 9, деформирующие шары 10, оправку 11, крепежный винт 12.

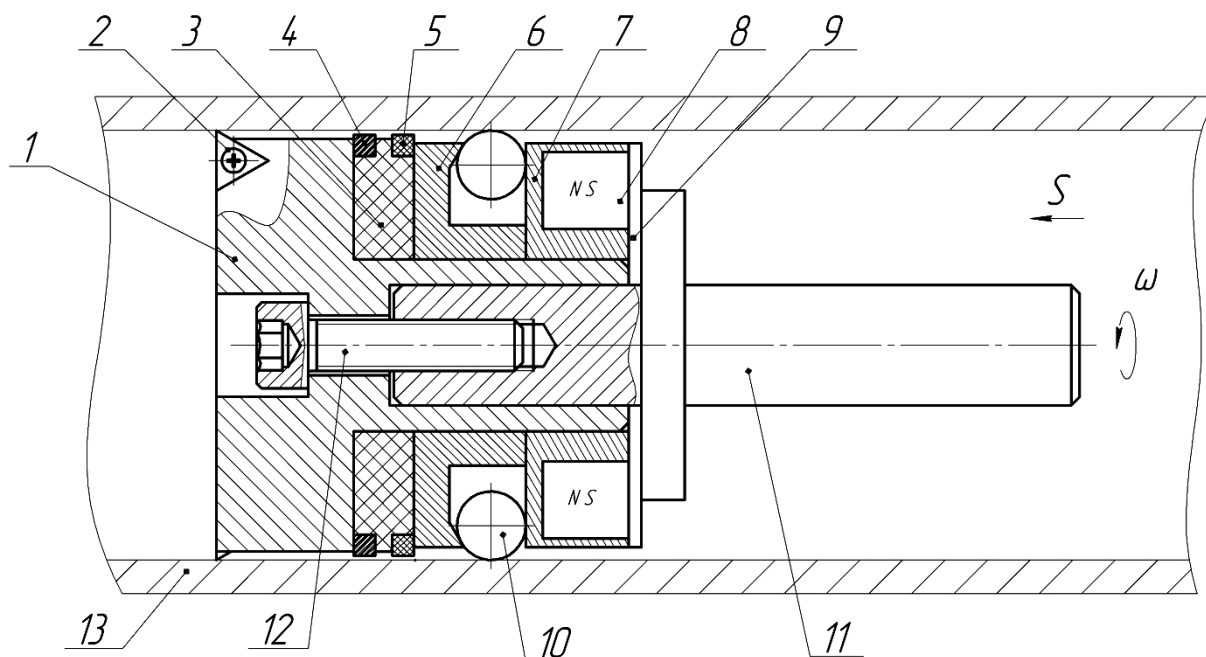


Рис. 5. Конструкция инструмента для совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим раскатыванием с осевой намагниченностью

Инструмент закрепляют в шпинделе станка посредством оправки 11, сообщают вращение и осевую подачу. Расточная головка 1, настроенная на определенный размер, осуществляет тонкое растачивание. Деформирующие шары 10 под действием центробежной силы разгоняются внутри кольцевой камеры инструмента, при этом смещаясь по торцовой поверхности обоймы 7 в направлении обрабатываемой детали 13, не теряя магнитного взаимодействия с источниками магнитного поля 8, расположенными внутри обоймы 7. В то же время поддерживается постоянная жесткость ведения деформирующих шаров, которые осуществляют гладкое раскатывание внутренней цилиндрической поверхности обрабатываемой детали.

Применение конструкции инструмента с осевой намагниченностью позволяет снизить скорость вращения инструмента (200...400 м/мин) по сравнению с инструментами, имеющими магнитную систему с радиальной намагниченностью, без ухудшения шероховатости обрабатываемой поверхности.

#### **Инструмент для совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим раскатыванием (двухрядная компоновка)**

Оправку 11 устанавливают в шпинделе станка и сообщают инструменту (рис. 6) вращение с угловой скоростью  $\omega$ . Заготовку 10 фиксируют в приспособлении на столе станка и сообщают ей подачу  $S$ .

Резцовый модуль осуществляет тонкое растачивание заготовки. Образующая в процессе тонкого растачивания резцом 2 стружка направляется стружколомом, установленным на передней поверхности режущей пластины, в зону действия дополнительного источника магнитного поля – кольцевого магнита 3, установленного следом за расточным модулем. Дополнительный источник магнитного поля также предназначен для предварительного намагничивания детали.

Отличительной особенностью данного инструмента является наличие

двух рядов шаров. Шары-ударники 4 и деформирующие шары 5 располагаются в двухполостной кольцевой камере 6, образованной немагнитопроводным диском 7 и магнитной обоймой 8. В магнитную обойму 8 вставлены цилиндрические постоянные магниты 9. Под действием магнитного поля, создаваемого цилиндрическими постоянными магнитами 9, и центробежной силы, возникающей в результате вращения инструмента с угловой скоростью  $\omega$ , шары-ударники 4 разгоняются во внутренней полости кольцевой камеры 6, периодически ударяя по деформирующим шарам 5. В свою очередь деформирующие шары 5 модифицируют тон-

ко расточенный поверхностный слой обрабатываемой заготовки. Деформирующие шары имеют меньший радиус по сравнению с шарами-ударниками, что позволяет локализовать ударное воздействие на деталь на меньшей площади контакта, при этом суммируя массы деформирующего шара и шара-ударника. Это повышает эффективность обработки – большее деформирование при меньших скоростях [14–18].

Дополнительный ряд шаров-ударников позволяет снизить скорость вращения инструмента (180...300 м/мин), уменьшить температуру в зоне обработки без снижения качественных характеристик обрабатываемой поверхности.

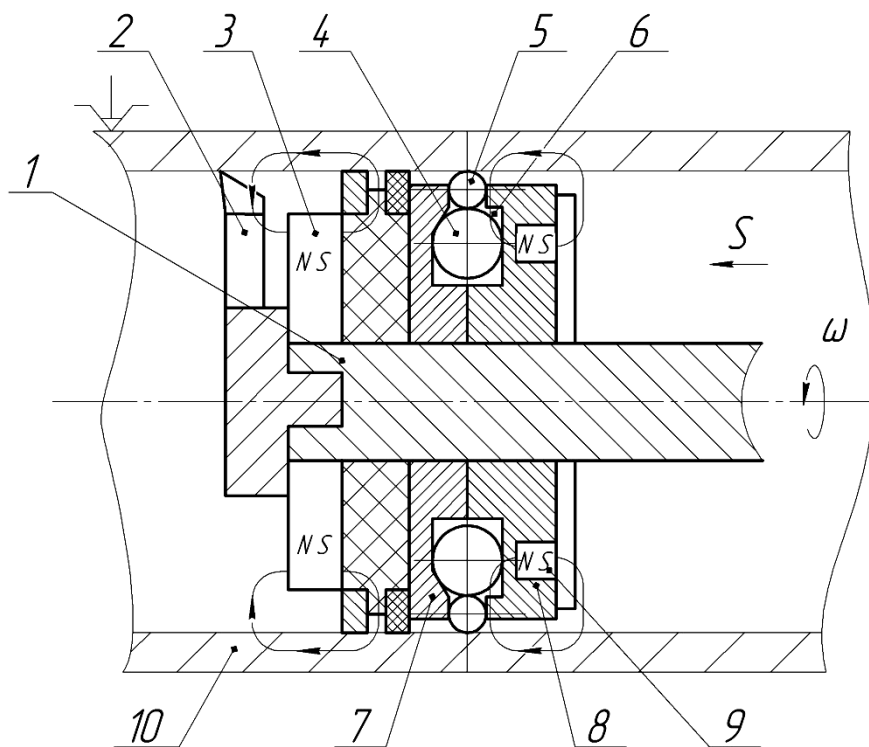


Рис. 6. Конструкция инструмента для совмещенной обработки резанием и магнитно-динамическим раскатыванием (двухрядная компоновка)

### Заключение

Приведены конструкции инструментов для совмещенной обработки, состоящих из следующих модулей: шлифование и магнитно-динамическое

раскатывание, хонингование и МДР, развертывание и МДР, растачивание и МДР. Отличительной особенностью спроектированных инструментов является возможность совмещения двух технологических операций за один ра-

бочий ход, что позволяет повысить производительность и снизить затраты на изготовление детали.

Конструкции разработанных инструментов адаптированы под использование на станках различных групп, таких как токарные, сверлильные, расточные, шлифовальные, фрезерные. Каждой группе станков соответствует первый модуль инструмента для совмещенной обработки. Второй модуль – модуль магнитно-динамического раскатывания – разработан таким образом, чтобы соответствовать скоростным возможностям соответствующего технологического оборудования.

При использовании инструментов для совмещенной обработки сохраняются положительные стороны, характерные

для обоих модулей инструмента. При этом первый модуль, как правило, обеспечивает необходимые точностные характеристики, а магнитно-динамический модуль – преимущества, характерные технологии магнитно-динамического раскатывания: интенсивное снижение шероховатости обрабатываемой поверхности, упрочнение поверхностного слоя, повышение микротвердости и износостойкости, формирование благоприятных остаточных напряжений.

При разработке компоновок инструментов был предложен ряд конструктивных решений по вопросам отвода стружки, образованной в результате прохода первого модуля инструмента, с целью предотвращения её попадания в зону деформирования второго модуля.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Высокопроизводительное магнитно-динамическое упрочнение внутренней поверхности цилиндров / Д. М. Свирепа, А. М. Довгалёв, А. С. Семёнова, О. Н. Юхновец // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев, 2015. – С. 51.*
2. Способ магнитно-динамического упрочнения внутренней поверхности круглого отверстия в металлической детали : пат. BLR 17976 / А. М. Довгалев, Д. М. Свирепа. – Оpubл. 28.02.2014.
3. **Довгалев, А. М.** Математическое моделирование процесса магнитно-динамического раскатывания / А. М. Довгалев, И. И. Маковецкий, Д. М. Свирепа // *Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. – 2010. – № 4 (64). – С. 26–30.*
4. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки цилиндрического отверстия детали : пат. BLR 19139 / А. М. Довгалев, С. А. Сухоцкий, Д. М. Свирепа. – Оpubл. 30.04.2015.
5. Математическое моделирование магнитно-динамического инструмента для упрочняющей обработки плоских поверхностей / А. М. Довгалев, Н. А. Леванович, С. А. Сухоцкий, Д. М. Свирепа // *Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2010. – № 4. – С. 55–65.*
6. Инструмент для поверхностного пластического деформирования отверстия детали : пат. BLR 18083 / А. М. Довгалев, Д. М. Свирепа, С. А. Сухоцкий, Д. М. Рыжанков. – Оpubл. 30.06.2014.
7. Устройство для отделочно-упрочняющей обработки : пат. BLR 10065 / А. М. Довгалев, Д. М. Свирепа, Д. М. Рыжанков. – Оpubл. 30.12.2007.
8. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки : пат. BLR 10188 / А. М. Довгалев, Д. М. Свирепа, Д. М. Рыжанков. – Оpubл. 28.02.2008.
9. **Довгалев, А. М.** Технология магнитно-динамического раскатывания и ее реализация в машиностроении / А. М. Довгалев, Д. М. Свирепа // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев, 2014. – С. 10–15.*
10. **Свирепа, Д. М.** Совмещенная обработка резанием и магнитно-динамическим накачиванием / Д. М. Свирепа, А. С. Семёнова // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев, 2017. – С. 48–49.*
11. **Свирепа, Д. М.** Особенности конструирования комбинированного магнитно-динамического раскатника / Д. М. Свирепа, А. С. Семёнова // *Образование, наука и производство в*

XXI веке : современные тенденции развития : материалы Юбилейной междунар. конф. – Могилев, 2016. – С. 132.

12. Магнитно-динамические инструменты для упрочнения наружных поверхностей вращения / А. М. Довгалев, С. А. Сухоцкий, Д. М. Свирепа, Д. М. Рыжанков // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. – 2009. – № 4. – С. 56–62.

13. Инструменты для магнитно-динамического упрочнения поверхностей деталей машин / Д. М. Довгалев, С. А. Сухоцкий, Д. М. Свирепа, Д. М. Рыжанков // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. – 2009. – № 4. – С. 94–97.

14. Двухрядные магнитно-динамические инструменты / А. М. Довгалев, С. А. Сухоцкий, Д. М. Свирепа, Д. М. Рыжанков // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2009. – № 2 (37). – С. 12–20.

15. **Довгалев, А. М.** Магнитно-динамическое упрочнение плоских поверхностей / А. М. Довгалев, С. А. Сухоцкий, Д. М. Свирепа // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев, 2007. – С. 55.

16. Упрочняющий инструмент : пат. BLR 15364 / А. М. Довгалев, Д. М. Свирепа, Д. М. Рыжанков, С. А. Сухоцкий. – Оpubл. 28.02.2012.

17. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки плоских поверхностей : пат. BLR 15262 / А. М. Довгалев, С. А. Сухоцкий, Д. М. Свирепа, Д. М. Рыжанков. – Оpubл. 30.12.2011.

18. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки плоских поверхностей: пат. BLR 15263 / А. М. Довгалев, С. А. Сухоцкий, Д. М. Свирепа, Д. М. Рыжанков. – Оpubл. 30.12.2011.

*Статья сдана в редакцию 20 декабря 2018 года*

**Дмитрий Михайлович Свирепа**, канд. техн. наук, Белорусско-Российский университет. E-mail: svdima@tut.by.

**Анна Сергеевна Семёнова**, аспирант, Белорусско-Российский университет. E-mail: ann\_li93@mail.ru.

**Сергей Александрович Сухоцкий**, канд. техн. наук, Белорусско-Российский университет. E-mail: darvin\_serg@mail.ru.

**Dzmitry Mikhailovich Svirepa**, PhD (Engineering), Belarusian-Russian University. E-mail: svdima@tut.by.

**Hanna Sergeevna Siamionava**, postgraduate, Belarusian-Russian University. E-mail: ann\_li93@mail.ru.

**Sergey Aleksandrovich Sukhotsky**, PhD (Engineering), Belarusian-Russian University. E-mail: darvin\_serg@mail.ru.

УДК 531

*Л. Л. Сотник, С. И. Русан, Л. А. Сиваченко*

## ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ ЭКСЦЕНТРИКОМ

UDC 531

*L. L. Sotnik, S. I. Rusan, L. A. Sivachenko*

## STUDY OF THE INTERACTION OF THE MATERIAL POINT WITH A CYLINDRICAL ECCENTRIC

### **Аннотация**

Приведены результаты исследования взаимодействия материальной точки с цилиндрическим эксцентриком. Проведен анализ уравнений движения точки. Определены параметры скорости и ускорения материальной точки и выполнен их анализ. Исследована сила инерции материальной точки. Проанализированы особенности взаимодействия точки с ребристым эксцентриковым валком.

### **Ключевые слова:**

материальная точка, скорость, ускорение, сила инерции, эксцентрик, валок.

### **Abstract**

The results of studying the interaction of the material point with a cylindrical eccentric are presented. An analysis of the equations of the point motion was carried out. Parameters of the velocity and acceleration of the material point were determined and their analysis was performed. The force of inertia of the material point was investigated. The interaction of the point with a ribbed eccentric roller was analyzed.

### **Key words:**

material point, velocity, acceleration, force of inertia, eccentric roller.

### **Введение**

Скоростные потоки движения материалов при их дроблении в эксцентриковых валках оказывают существенное влияние не только на величину сдвиговых деформаций, но и на выходные показатели процесса в целом. Поэтому анализ скоростей и ускорений, возникающих в процессе измельчения, является актуальной задачей.

Под эксцентриком (рис. 1) будем понимать цилиндр, вращающийся с угловой скоростью  $\omega$  вокруг оси  $O$ , что не совпадает с его геометрической осью  $O_1$ . Расстояние  $e$  между осями  $O$  и  $O_1$  будем называть эксцентриситетом. Материальной точкой в исследовании моделирует-

ся твердое тело малых размеров, которое выполняет поступательное движение.

Результаты исследования могут быть использованы при проектировании объектов техники, предназначенных, в частности, для дробления материалов. Один из таких объектов описан в [1–5].

### **Основная часть**

*Вывод уравнения движения точки  $M$ .* Предположим, что в начальном положении  $M_0$  точка соприкасается с цилиндром. При повороте цилиндра на угол  $\varphi$  точка удаляется от оси  $O$  по горизонтальному диаметру  $d-d$  в произвольное положение  $M$ , определяемое координатой  $x = OM$  (рис. 2), где



$OM = OM_1$ . Найдем  $x$ . Согласно рис. 2 получаем

$$M_1M' = x \sin \varphi; \quad M_1M' = r \sin \varphi_1; \quad (1)$$

$$O_1M' = r \cos \varphi_1; \quad O_1M' = x \cos \varphi + e. \quad (2)$$

Отбросим левые части равенств (1) и (2):

$$r \sin \varphi_1 = x \sin \varphi;$$

$$r \cos \varphi_1 = x \cos \varphi + e. \quad (3)$$

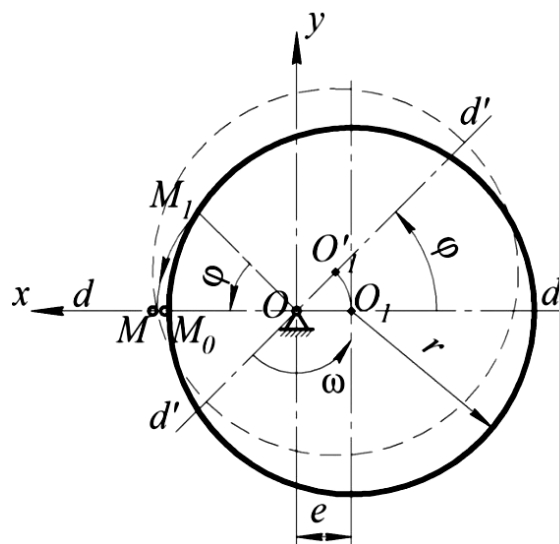


Рис. 1. Схема сечения вала

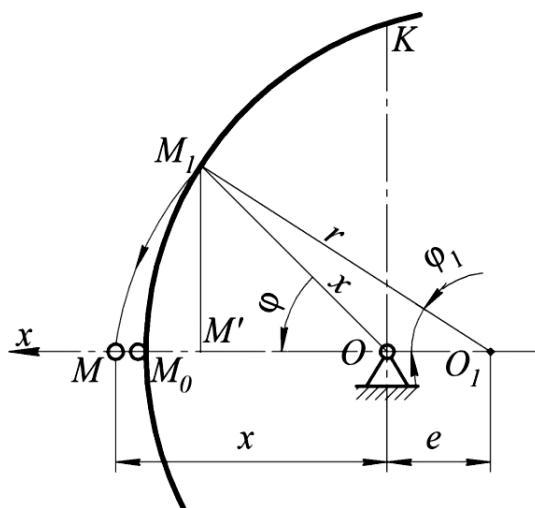


Рис. 2. Схема для определения уравнения движения  $x(\varphi)$

Возведем в квадрат левые и правые части соотношений (3) и сложим результат:

$$\begin{aligned} r^2(\sin^2 \varphi_1 + \cos^2 \varphi_1) &= \\ &= x^2 \sin^2 \varphi + (x \cos \varphi + e)^2. \end{aligned}$$

Отсюда

$$x^2 \sin^2 \varphi + x^2 \cos^2 \varphi + 2x \cos \varphi e + e^2 = r^2$$

или

$$x^2 + bx - c = 0, \quad (4)$$

где  $b = 2e \cos \varphi$ ;  $c = r^2 - e^2$ .

Реальный корень уравнения (4)

$$x = x_1 = -e \cos \varphi + \sqrt{e^2 \cos^2 \varphi + c}.$$

Приведем его к следующему виду:

$$x = -e \cos \varphi + \sqrt{r^2 - e^2 \sin^2 \varphi}. \quad (5)$$

*Определение скорости и ускорения движения точки.* Получив уравнение движения (5), по формулам кинематики  $v = \dot{x}$ ,  $a = \dot{v} = \ddot{x}$  находим его скорость  $v$  и ускорение  $a$ .

Поскольку эксцентрик вращается равномерно, то в формуле (5)  $\varphi = \omega t$ . Определим

$$\begin{aligned} v &= e\omega \sin \varphi + \frac{1}{2} \cdot \frac{0 - 2e^2 \omega \sin \varphi \cos \varphi}{\sqrt{r^2 - e^2 \sin^2 \varphi}} = \\ &= e\omega \sin \varphi - \frac{e^2 \omega \sin \varphi \cos \varphi}{\sqrt{r^2 - e^2 \sin^2 \varphi}}. \end{aligned}$$

Окончательно получаем

$$v = e\omega \sin \varphi \left( 1 - \frac{e \cos \varphi}{\sqrt{z}} \right). \quad (6)$$

Аналогично, путем дифференцирования функции  $v$ , находим

$$a = \frac{e\omega^2 (4 \cos \varphi z \sqrt{z} - 4e \cos 2\varphi z - e^3 \sin^2 2\varphi)}{4z\sqrt{z}}, \quad (7)$$

где  $z = r^2 - e^2 \sin^2 \varphi$ .

*Анализ скорости точки.* Траекторией движения точки  $M$  по уравнению (5) является отрезок оси  $Ox$  длиной  $2e$ . Исследуем скорость движения. Сначала найдем ее максимальное значение. Для этого проведем исследование функции (6) на экстремум. Как видно из соответствующей формулы, она представляет собой произведение двух

множителей ( $v = f_1(\varphi) \cdot f_2(\varphi)$ ) и достигает наибольшей величины при том значении  $\varphi = \varphi_\kappa$ , при котором каждый из множителей,  $f_1(\varphi)$ ,  $f_2(\varphi)$ , принимает максимум (при общем  $\varphi_\kappa$ ).

Исследуем доминирующий множитель  $f_1(\varphi) = e\omega \sin \varphi$ .

Находим производную:

$$\frac{df_1(\varphi)}{d\varphi} = e\omega \cos \varphi;$$

приравниваем ее к нулю:

$$e\omega \cos \varphi_\kappa = 0.$$

Отсюда  $\varphi_\kappa = \pi/2$ .

Определяем характер экстремума:

$$\frac{d^2 f_1(\varphi)}{d\varphi^2} = -e\omega \sin \varphi < 0.$$

Приходим к выводу: при  $\varphi = \pi/2$  множитель  $f_1(\varphi)$  принимает максимальное значение (при общем  $\varphi_\kappa$ ). Легко убедиться, что при этом и функция  $f_2(\varphi_\kappa) = f_2(\pi/2) = 1$ , т. е. достигает максимума. Таким образом,  $v_{\max} = v(\pi/2)$ .

По формуле (6) находим  $v_{\max} = e\omega$ . Соответствующая координата точки  $M$   $x(\pi/2) = \sqrt{r^2 - e^2} = OK$  (см. рис. 2). Подчеркиваем, что здесь проведено приближенное исследование на экстремум по доминирующему множителю  $f_1(\varphi)$ . Результат уточним при построении графиков.

Построим график изменения скорости  $v(\varphi)$  на интервале  $\varphi = (0 \dots \pi)$  радиан. Чтобы придать ему обобщенный вид (без конкретизации в числах геометрических параметров эксцентрика), приводим уравнение (6) к следующему виду:

$$v = \mu r \omega \sin \varphi \left( 1 - \frac{\mu \cos \varphi}{\sqrt{1 - \mu^2 \sin^2 \varphi}} \right),$$

где  $\mu = \frac{e}{r}$ .

Построенный график скорости при  $\mu = 0,1$  показан на рис. 3, а. Левая его часть, что начинается от  $\varphi = \pi/2$ , будет соответствовать реальному движению точки при условии, что она продолжает оставаться в контакте с эксцентриком.

Это возможно при наличии сдерживающего сопротивления движению. Свободная же материальная точка, достигнув скорости  $v_{\max}$ , отделяется от эксцентрика и продолжает свое движение уже по инерции со скоростью  $v = v_{\max}$ . Соответствующий участок графика скорости показан на рис. 3, а пунктиром. Естественно, что ускорение на этом участке равно нулю.

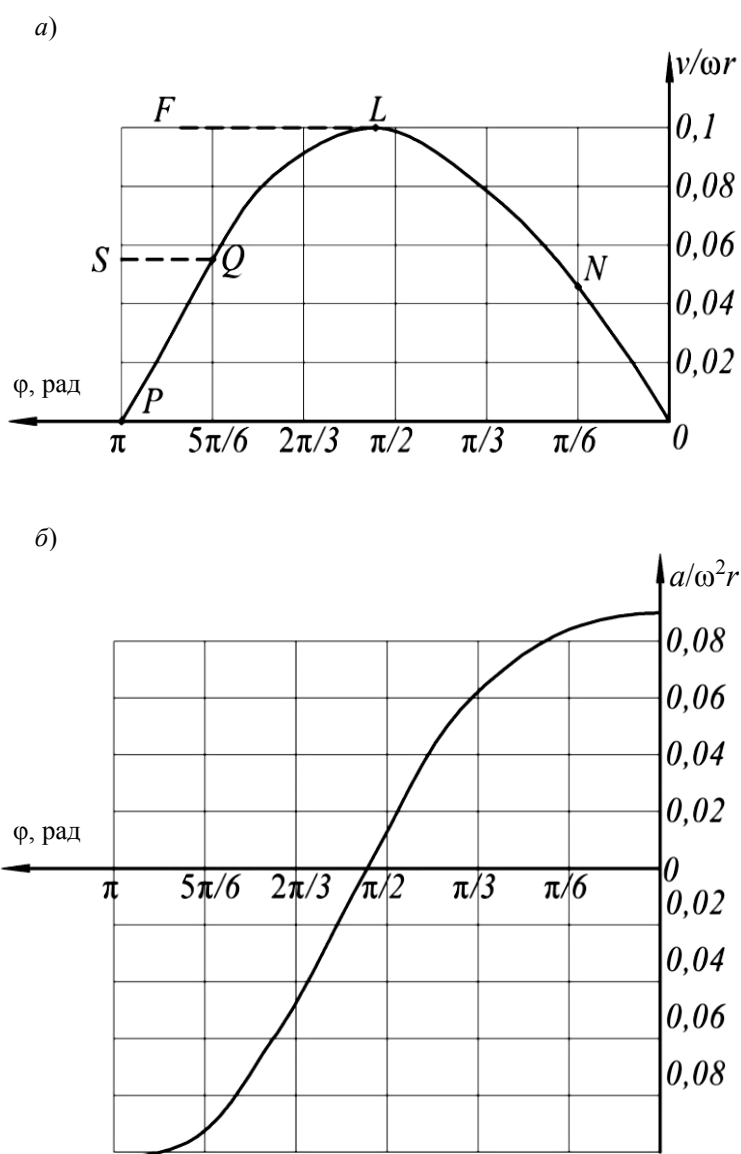


Рис. 3. График скорости (а) и ускорения (б) точки *M*

Ранее исследовалось движение точки  $M$  с начального положения  $M_0$ , где она находится на минимальном расстоянии  $OM_0$  от оси вращения эксцентрика. Найденные и описанные для нее кинематические характеристики справедливы и для любой другой точки, находящейся на окружности радиусом  $OM_0$ .

Представим, что точка  $M$  при  $\varphi = 0$  находится на расстоянии  $OM > OM_0$ . Тогда поверхность эксцентрика при вращении достигнет точки  $M$  только после поворота на некоторый угол  $\varphi$ , и контакт с ним начнется ударом. Его эффект зависит от физических свойств материалов эксцентрика и точки  $M$ . Если допустить, что точка  $M$  дальше не отделяется от эксцентрика, то его скорость будет определяться частью построенного графика. Например, как эксцентрик достигнет точки  $M$  при  $\varphi = \pi/6$ , то его скорости соответствует участок  $NL$ , далее –  $LF$  или  $LP$  (см. рис. 3, *a*). Если соприкосновение состоится при  $\varphi = 5\pi/6$ , то движение будет определяться графиком  $QS$  или  $QP$ .

*Ускорение точки и сила инерции.* Для вычисления ускорения используем формулу (7) и введенные соотношения  $\mu$ . Тогда в формуле (7)  $e = \mu r$ ,  $z = (1 - \mu^2 \sin^2 \varphi)r^2$ . Соответствующий формуле график представлен на рис. 3, *б*. Как и для скорости, левая часть графика ускорения (где оно отрицательное) соответствует реальному положению точки только при условии, что во время движения она остается в контакте с цилиндром. При отсутствии контакта точка движется равномерно (по инерции).

Из курса физики известно, что при неравномерном движении точки массы  $m$  возникает сила инерции  $\vec{F}_i = -m\vec{a}$  в направлении, противоположном ускорению. Характер изменения силы  $F_i$  описывается тем же графиком, что и

ускорение  $a$ . Сила инерции приложена к эксцентрику. По аксиоме о равенстве действия и противодействия такая же реактивная сила  $R$  со стороны эксцентрика приложена и к точке  $M$ .

*Особенности взаимодействия пункта с ребристым эксцентриком.* Для более активного взаимодействия цилиндра с материальной точкой на его поверхности вдоль образующих могут устанавливаться выступы – ребра, которые имеют форму стержней. На рис. 4 в поперечном сечении цилиндра схематично показаны ребра 1, 2, 3, 4; их расстояния от оси вращения обозначены буквами  $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4$ . Будем считать, что материальная точка  $M$  свободна и ее движение определяется силами взаимодействия с цилиндром и силой тяжести  $p$  (ранее предполагалось, что сила тяжести точки уравнивается связью).

Вначале точка неподвижна и находится в четверти  $xOy$  вертикальной плоскости. Захваченная ребром 1, она приобретает скорость  $v_1 = \omega\rho_1$  и ускорение  $a_1 = \omega^2\rho_1$ . Под действием центробежной силы  $F_1 = ma_1$  материальная точка соскальзывает с ребра 1 и попадает на участок 1–2 поверхности цилиндра и затем на ребро 2; а может попасть и сразу на участок 2–3 и ребро 3 – это зависит от величины  $\omega$ , длин участков и других факторов. Последним выступом, с которым соприкасается материальная точка, может быть (но не обязательно) ребро 4. Далее она движется только под действием силы тяжести  $p$ .

Пусть в момент ухода из ребра 4 точка  $M$  займет положение  $M_0$  (см. рис. 4) с координатами  $x_0, y_0$  на расстоянии  $\rho_4 = r + e$  от оси вращения. Величина ее скорости в этот момент  $v_0 = \omega\rho_1$ . Уравнение параболы, которую описывает затем материальная точка, определяется из системы дифференциальных уравнений  $\ddot{x} = 0, \ddot{y} = -g$  с начальными условиями  $x(0) = x_0, y(0) = y_0, v(0) = v_0$ ,

где  $g$  – ускорение свободного падения.

Скорость и ускорение точки в произвольном положении

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}; \quad a = a_y = -g,$$

$$\text{где } v_x = \dot{x}; \quad v_y = \dot{y}.$$

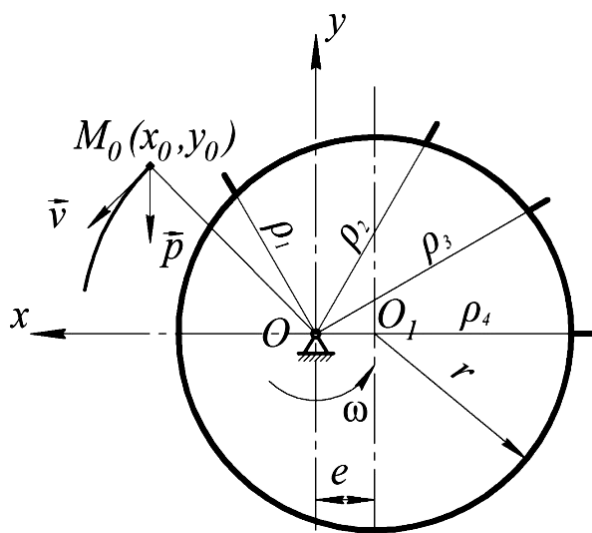


Рис. 4. Ребристый эксцентриковый валок

### Заключение

В приведенном исследовании анализируется движение материальной точки под действием гладкого кругового эксцентричного цилиндра. Получены формулы для скорости и ускорения точки, построены и описаны их графики; найдена сила инерции. Задача рас-

сматривается в более простой постановке. Оценена возможность анализа взаимодействия материальной точки с ребристым цилиндром. При углублении исследования необходимо учесть шероховатость поверхностей цилиндра и тела, моделируемых материальным пунктом, упругость материалов, силы тяжести и удара.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сиваченко, Л. А. Анализ работы подшипниковых узлов эксцентрикового вала вибровалкового измельчителя / Л. А. Сиваченко, Л. Л. Сотник // Вестн. БарГУ. Сер. Технические науки. – 2017. – Вып. 5. – С. 87–92.
2. Сиваченко, Л. А. Основы проектирования вибровалкового агрегата для дезинтеграторной обработки минеральных материалов / Л. А. Сиваченко, Л. Л. Сотник, И. А. Богданович // Научные технологии и инновации : сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф. Ч. 4. Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов. – Белгород, 2016. – С. 179–185.
3. Сотник, Л. Л. Кинематический анализ эксцентрикового вибровалкового измельчителя / Л. Л. Сотник, С. И. Русан, Л. А. Сиваченко // Ударно-вибрационные системы и машины для строительной и горной отраслей : материалы VI Междунар. науч. симпозиума. – Орел, 2017. – С. 233–241.
4. Сиваченко, Л. А. Оценка эффективности дробления вибровалкового измельчителя / Л. А. Сиваченко, А. Н. Хустенко, Л. Л. Сотник // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2017. – № 4 (57). – С. 89–97.

5. **Сотник, Л. Л.** Исследование влияния отдельных факторов на степень измельченности в вибро-валковом измельчителе методом математического планирования эксперимента / Л. Л. Сотник, Л. А. Сиваченко // Горная механика и машиностроение. – 2018. – № 3. – С. 4–12.

*Статья сдана в редакцию 20 декабря 2018 года*

**Леонид Леонидович Сотник**, ст. преподаватель, Барановичский государственный университет. Тел.: +375-298-03-45-28.

**Сергей Иванович Русан**, канд. техн. наук, Барановичский государственный университет.

**Леонид Александрович Сиваченко**, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-447-92-86-83.

**Leonid Leonidovich Sotnik**, senior lecturer, Baranovichi State University. Phone: +375-298-03-45-28.

**Sergei Ivanovich Rusan**, PhD, (Engineering), Baranovichi State University. Phone: +375-298-03-45-28.

**Leonid Aleksandrovich Sivachenko**, DSc, (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University. Phone: +375-447-92-86-83.

---

УДК 629.113; 629.114

*В. П. Тарасик*

## О ТЕРМИНОЛОГИИ В ОБЛАСТИ АВТОТРАКТОРОСТРОЕНИЯ

---

UDC 629.113; 629.114

*V. P. Tarasik*

## ON TERMINOLOGY IN THE FIELD OF AUTOMOBILE AND TRACTOR MANUFACTURING

---

### **Аннотация**

Изложены результаты анализа терминов и их определений, используемых в области автотракторостроения, и предложений по их реформированию, опубликованных в печатных изданиях.

### **Ключевые слова:**

термин, определение термина, терминология, двигатель, трансмиссия, ведущее колесо, опорная поверхность дороги, вращающий момент, сопротивление движению автомобиля.

### **Abstract**

This paper gives the results of the analysis of terms and their definitions used in the field of automobile and tractor manufacturing, as well as the proposals for their revision made in different publications.

### **Keywords:**

term, term definition, terminology, engine, transmission, drive wheel, road surface, torque, resistance to vehicle movement.

---

По мере развития науки и техники в области автотракторостроения появляются новые технологии проектирования и методы исследования процессов функционирования механизмов и систем автомобиля и трактора, что сопровождается введением и использованием новых терминов и определений. Нередко происходит заимствование терминов из зарубежных публикаций, которые не всегда имеют научное обоснование, иногда носят бытовой характер или профессиональный жаргон. В этой связи научное обоснование наименований новых терминов имеет принципиальное значение для развития методологии автомобильной и тракторной науки.

Основоположниками научной терминологии в области автомобильной науки являются проф. Н. Е. Жуковский и акад. Е. А. Чудаков.

В [1, с. 15–20] Е. А. Чудаковым приведены рекомендуемые им термины и наименования параметров и характеристик автомобиля: сил, реакций, моментов, мощности, масс, моментов инерции, геометрических размеров, углов, скоростей и ускорений, а также специфических терминов, принятых для наименования параметров эксплуатационных свойств автомобиля и коэффициентов для их оценки.

Однако в дальнейшем многие авторы учебников и монографий начали вводить свои термины без должного их научного обоснования. Постоянно возникает желание многих авторов проводить реформирование существующей терминологии. К сожалению, ряд таких терминов оказался включённым в содержание ГОСТов на терминологию и определения.

В первом номере журнала «Тракторы и сельхозмашины» за 2018 г. опубликована статья сотрудников Московского политехнического университета канд. техн. наук А. П. Парфёнова и канд. техн. наук Ю. С. Щетинина «Об унификации некоторых терминов и понятий, применяемых при изучении наземных транспортно-технологических средств» [2]. Авторы статьи предлагают унифицировать ряд терминов, используемых в области автотракторостроения, и приводят свои соображения на основе анализа ряда известных литературных источников.

Действительно, некоторые используемые термины не имеют соответствующего научного обоснования и противоречат физическому смыслу отображаемого ими явления или процесса. Но и предлагаемые ими унифицированные термины также не сопровождаются убедительными обоснованиями.

Основы формирования терминологии изложены в Большой Советской Энциклопедии, авторами которой являются крупнейшие российские учёные (БСЭ, 1976, т. 25, с. 473–474). В ней приведены наиболее обоснованные наименования общенаучных терминов. Например, дано чёткое определение существенно различающихся между собой терминов «вращающий момент» и «крутящий момент» по физическому содержанию отображаемых ими процессов.

«Вращающий момент – мера внешнего воздействия, изменяющего угловую скорость вращающегося тела» (БСЭ, 1971, т. 5, с. 425). Вращающий момент является параметром потока энергии, подводимой к вращающемуся твёрдому телу и приводящей к изменению угловой скорости и кинетической энергии данного тела. Для отображения этой качественной стороны сущности термина «момент» он содержит терминологический элемент «вращающий». Следовательно, термин «вращающий момент» связан с видом движения (вращательное), при котором передаётся поток энергии.

«Крутящий момент» – это термин научных дисциплин «Сопротивление материалов» и «Теория упругости». Он связан с отображением явления кручения, скручивания стержней (валов, торсионов и т. п.). Этот термин применяется при определении деформации и напряжения кручения (БСЭ, 1973, т. 13, с. 501). При необходимости оценки величины прогиба вала (стержня, балки) используется «изгибающий момент», что отображается в этом случае терминологическим элементом «изгибающий» (БСЭ, 1972, т. 10, с. 57).

В настоящее же время во всех учебниках, ГОСТах и других носителях информации используется исключительно термин «крутящий момент», что в большинстве реальных случаев описываемых явлений или процессов неверно. Например, неправильно применять термины «крутящий момент двигателя», «крутящий момент на валу трансмиссии», «крутящий момент, подводимый к ведущему колесу» и т. п. В таких случаях надлежит использовать термин «вращающий момент». Этот же термин применяется в теории электропривода при определении механической нагрузки на электродвигатель [13, 14].

Именно данный термин рекомендовал к употреблению акад. Е. А. Чудаков [1, с. 16]. Отметим также очень чёткую и однозначную его формулировку наименований терминов, характеризующих различные радиусы колеса [1, с. 17], которые положены в основу действующего ГОСТа [3]. Лишь два принятых академиком термина вызывают возражения: «полная окружная сила колеса» и «тангенциальная сила» (реакция, скорость, ускорение).

Полную окружную силу колеса  $F_{к0}$  предложено определять по формуле [1]

$$F_{к0} = \frac{M_{к}}{r_{к}}, \quad (1)$$

где  $M_{к}$  – вращающий момент, прило-



женный к колесу;  $r_k$  – радиус качения колеса.

Отмечается, что полная окружная сила  $F_{k0}$  приложена к колесу на расстоянии радиуса  $r_k$  от его оси. Как известно, сила – векторная величина, определяемая тремя факторами: точкой приложения, направлением и модулем. Два первых фактора при использовании данного термина отсутствуют. Это создаёт неопределённость при его применении, что привело к многочисленным ошибкам и заблуждениям всех, кто использовал такой термин.

Авторы учебников и монографий в формуле (1) используют различные радиусы колеса: в [6, 7] – радиус качения колеса без скольжения  $r_{k0}$ ; в [8] – радиус качения  $r_k$ ; в [9, 10] – динамический радиус  $r_d$ . Затем по этой же формуле рассчитывают полную тяговую силу  $F_T$ . Поскольку продольная реакция дороги на ведущее колесо  $R_x$  равна по модулю тяговой силе  $F_T$ , а направление вектора  $R_x$  совпадает с направлением скорости автомобиля  $v_a$ , реакцию  $R_x$  полагают **тяговой силой**, называя её **касательной силой тяги** [9, 10]. Отсюда следует вывод, что автомобиль движется под действием касательной силы тяги, т. е. энергию для движения автомобиля поставляет опорная поверхность дороги. Нужно отметить, что существуют учебники, в которых сформулирован именно такой вывод.

Рассмотрим возможность формирования энергии движения автомобиля продольной реакцией дороги  $R_x$  на ведущее колесо. Физической природой силы  $R_x$  является трение или сцепление (при проскальзывании колеса относительно поверхности дороги  $R_x$  – сила трения, при отсутствии скольжения  $R_x$  – сила сцепления). Сила  $\vec{R}_x$  – векторная величина, состоящая из геометрической суммы векторов сил трения (или сцеп-

ления), возникающих на поверхностях элементарных площадок контакта колеса с поверхностью дороги.

Как известно, мощность  $P$  любой силы  $F$  равна скалярному произведению вектора этой силы  $\vec{F}$  на вектор скорости точки её приложения  $\vec{v}$ :

$$P = \vec{F} \vec{v} = F v \cos(\vec{F}, \vec{v}).$$

Мощность силы  $\vec{R}_x$  определим по формуле

$$P_x = \vec{R}_x \vec{v}_k = R_x v_k \cos(\vec{R}_x, \vec{v}_k), \quad (2)$$

где  $\vec{v}_k$  – вектор скорости точки приложения вектора силы  $\vec{R}_x$ .

Если при движении автомобиля в конкретных дорожных условиях отсутствует внешнее скольжение, тогда  $\vec{v}_k = 0$  и мощность силы  $\vec{R}_x$  равна нулю, т. е.  $P_x = 0$ . При скольжении ведущего колеса относительно дороги векторы  $\vec{R}_x$  и  $\vec{v}_k$  имеют взаимно противоположные направления, поэтому мощность силы  $\vec{R}_x$  отрицательна, т. е. затрачивается энергия на преодоление силы трения  $\vec{R}_x$ . Таким образом, продольная реакция дороги на ведущее колесо не может быть движущей силой автомобиля. Следовательно, касательной силы тяги не существует, а есть лишь продольная реакция дороги на колесо  $\vec{R}_x$ .

Для определения процесса формирования энергии движения, создания и расположения тяговой силы в [4, 5] автомобиль представлен в виде сложной механической системы, состоящей из трёх взаимодействующих между собой компонентов – корпуса автомобиля с расположенными в нём источником и преобразователями энергии, ведущего колеса и опорной поверхности дороги, отображающей внешнюю среду. На основе анализа их взаимодействия показано, что **тяговая сила** приложена на

**оси ведущего колеса** и преодолевает силу сопротивления движению корпуса автомобиля, также приложенную на его оси. Аналогичное мнение у авторов учебников [6, 7], однако оно изложено без соответствующих доказательств (возможно, из интуитивных соображений). Очевидно, потому, что их представление о взаимодействии колеса с дорогой было связано с понятием «полная окружная сила колеса».

Колесо совершает вращательное движение относительно собственной оси вращения и поступательное вместе с корпусом автомобиля. Поэтому для вращательного движения необходимо воздействие в виде вращающего момента (вращающий момент, подводимый к ведущему колесу, момент сопротивления качению, инерционный момент колеса), а взаимодействие колеса с корпусом автомобиля определяется силами, приложенными к оси колеса (тяговая сила колеса, тормозная сила колеса, сила сопротивления корпуса, нормальная нагрузка на колесо, поперечная сила). Детально рассмотрено и взаимодействие ведущего колеса с опорной поверхностью дороги [4, 5].

Источником энергии, необходимой для движения автомобиля и преодоления сил сопротивления его движению, является топливо. Двигатель автомобиля преобразует химическую энергию топлива в механическую, которая передаётся через трансмиссию на ведущие колёса. На ведущих колёсах формируется тяговый момент автомобиля. Функция тягового момента используется при моделировании движения автомобиля как целостной системы, в которой тяговая сила и сопротивление корпуса на оси ведущего колеса являются внутренними взаимно уравновешивающимися силами. При торможении автомобиля его движение осуществляется под действием силы инерции и тормозного момента на колёсах. Если колёса заблокируются тормозом, тогда торможение автомобиля осуществляется си-

лами трения в контакте тормозящих колёс с опорной поверхностью дороги, в результате работы которых происходит поглощение накопленной автомобилем кинетической энергии.

Использование акад. Е. А. Чудаковым в [1] терминологии «тангенциальная» в наименовании сил или реакций (тангенциальная сила, реакция) лишено физического смысла, т. к. определение их направлений в пространстве не имеет никакого отношения к тангенсу углов направлений соответствующих сил и реакций. При моделировании силового взаимодействия двух объектов, например, колеса и корпуса автомобиля или колеса и опорной поверхности дороги, обычно силу взаимодействия раскладывают на составляющие, направленные вдоль осей используемой декартовой системы координат. Поэтому составляющие называют согласно направлениям осей координат: продольная, поперечная, вертикальная (нормальная). Например, реакции дороги на колесо: продольная (но не тангенциальная!), поперечная и нормальная.

Во многих случаях при моделировании используются оси естественной системы координат. Эти оси имеют следующие наименования: касательная, нормаль и бинормаль. Тогда, например, при разложении вектора ускорения на составляющие их называют соответственно касательное ускорение, нормальное ускорение и бинормальное ускорение. Касательное ускорение направлено по касательной к траектории движения исследуемой точки, нормальное – по радиусу кривизны элементарного криволинейного участка траектории в направлении к мгновенному центру скоростей, бинормальное – перпендикулярно обоим предыдущим.

В научной литературе по автотракторостроению распространены термины «циркуляция мощности» и «переключение передач без разрыва потока мощности». Мощность – это характеристика изменения потока энергии во

времени, т. е. производная энергии по времени в процессе выполнения работы машиной. От двигателя к ведущим колёсам автомобиля передаётся (поступает) поток энергии, а не поток мощности, поэтому упомянутые термины некорректны: вместо «мощности» необходимо употреблять терминологический элемент «энергия». Это же относится и к источникам энергии. Термин «источник мощности» некорректен. Параметрами потока энергии при её передаче посредством вращательного движения являются вращающий момент (потенциал энергии) и угловая скорость (фазовая координата сосредоточенной массы – носителя потока энергии). Поэтому вместо термина «циркуляция мощности» необходимо употреблять термин «циркуляция энергии», а вместо термина «переключение передач без разрыва потока мощности» – термин «переключение передач с перекрытием».

Есть ещё один вполне обоснованный способ выбора терминологии для технических объектов – это использование в качестве терминологического элемента важнейшего выходного параметра объекта, характеризующего его основное свойство и назначение. Рассмотрим на конкретном примере. В автотракторостроении получил широкое распространение термин «силовой агрегат», употребляемый для обозначения различных по конструктивному исполнению объектов (двигателя, совокупности двигателя и коробки передач, отдельной коробки передач и др.).

Из рассматриваемой области можно привести пример технического объекта, для которого подходит данный термин, – это автомобильный домкрат. На входе домкрата имеем некоторый источник энергии (обычно, человек), а на выходе получаем силу, необходимую для подъема автомобиля. Это, условно, силовой агрегат. Для реактивного двигателя также приемлем данный термин, так как выходным параметром его является сила тяги.

Выходными параметрами поршне-

вого двигателя внутреннего сгорания, различных механизмов трансмиссии, блоков двигатель–коробка передач, как известно, являются вращающий момент, мощность, частота вращения выходного вала. При этом никакие силы не фигурируют в качестве параметров данных механизмов. Поэтому нет ни малейших оснований в таком случае использовать термин «силовой агрегат». Двигатель предназначен для генерирования механической энергии, механизмы трансмиссии преобразуют параметры потока передаваемой через них энергии. Абсолютно очевидно, что это энергетические агрегаты. Поэтому необходимо использовать термин «энергетический агрегат».

Рассмотрим предложения, изложенные в [2], по реформированию некоторых терминов в области автотракторостроения и их определений.

В ГОСТе на параметры проходимости автомобиля [12] предусмотрены термины «сцепная масса автомобиля» и «коэффициент сцепной массы автомобиля». Определение первого термина: «Часть массы автомобиля, создающая нормальные нагрузки ведущих колёс автомобиля». Определение второго термина: «Отношение сцепной массы автомобиля к массе автомобиля». В [2] предлагается заменить наименование терминологического элемента «масса» на «вес». Для этого нет никаких оснований. Во-первых, термин «масса» входит в состав Международной системы единиц (СИ), во-вторых, слово «вес» представляет собой бытовое выражение. Кроме того, оно неоднозначное, в частности, может характеризовать значимость какого-либо свойства или качества предмета или явления.

Для оценки сцепления колеса с опорной поверхностью в [2] предлагается термин «коэффициент сцепления движителя с поверхностью пути» и даются следующие определения: «Отношение силы тяги по сцеплению к сцепному весу машины» и «Сила тяги по сцеплению соответствует максималь-

ному её значению в устойчивом диапазоне на данном опорном основании». Предлагаемые определения противоречивы и неоднозначны, как и рассматриваемое явление. В [4, 6, 7] приведен ряд определений, вполне корректных, и они могут служить основой для формулировки соответствующих терминов и определений. Сложность проблемы заключается в том, что сила сцепления колеса с опорной поверхностью изменяется в очень широких пределах в зависимости от дорожных условий и величины скольжения ведущего колеса. Поэтому для её характеристики необходимо несколько терминов и определений.

Первый возможный термин: «удельная продольная реакция  $\gamma_x$ » [4] (вариант: «коэффициент продольной реакции  $\gamma_x$ » [6]). Определяется по формуле

$$\gamma_x = \frac{R_x}{R_z}, \quad (3)$$

где  $R_x$  – продольная реакция опорной поверхности на ведущее колесо;  $R_z$  – нормальная реакция опорной поверхности на ведущее колесо.

Этот термин отображает характеристику изменения  $\gamma_x$  в зависимости от скольжения ведущего колеса (упругого и внешнего) в конкретных дорожных условиях и представляется в виде графика зависимости  $\gamma_x = f(\lambda_s)$ , где  $\lambda_s$  – коэффициент скольжения колеса ( $0 \leq \lambda_s \leq 1$ ). Максимальное значение  $\gamma_x$  называют максимальным коэффициентом сцепления  $\varphi_{\max}$  [4, 6]. Значение  $\gamma_x$  при  $\lambda_s = 1$  (полное скольжение) на 10...30 % меньше  $\varphi_{\max}$ . При проведении испытаний наиболее устойчивые значения  $\gamma_x$  получают при  $\lambda_s = 1$  и приводят их в справочных материалах с наименованием «коэффициент сцепления  $\varphi_x$ ». Таким образом,

для оценки сцепления колеса с опорной поверхностью необходимо использовать не менее трёх показателей.

Вместо термина «коэффициент сопротивления качению» в [2] предлагается термин «коэффициент сопротивления прямолинейному движению машины» и его определение «отношение текущего значения силы сопротивления прямолинейному движению машины к её сцепному весу». Это предложение не выдерживает никакой критики, поскольку противоречит давно сформулированным и экспериментально подтвержденным результатам, изложенным в [1, 6, 7, 11] и закреплённым в стандарте [3].

Для оценки суммарной силы дорожного сопротивления используется термин «коэффициент суммарного дорожного сопротивления» [4] или сокращённо «коэффициент сопротивления дороги» [1, 6]. Предлагаемая же в [2] изменённая формулировка термина «коэффициент сопротивления поверхности пути» ничего нового и существенного не даёт, но при этом неудовлетворительна с точки зрения стилистики.

Термин «свободная мощность двигателя» не соответствует его определению «часть эффективной мощности, расходуемая на обслуживание двигателя», приведенному в [2]. Для оценки затрат мощности на собственные нужды существует термин «коэффициент отбора мощности на привод вспомогательного оборудования двигателя» – относительная безразмерная величина, что, безусловно, более предпочтительно для применения, чем предлагаемая абсолютная величина затраты мощности [4, 6].

В заключение отметим, что введение новых терминов и их определений требует профессионального научного обоснования, обсуждения и согласования всеми заинтересованными сторонами и пользователями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Чудаков, Е. А.** Избранные труды : в 2 т. Т. 1. Теория автомобиля / Е. А. Чудаков. – Москва : Академия наук СССР, 1961. – 464 с.
2. **Парфёнов, А. П.** Об унификации некоторых терминов и понятий, применяемых при изучении наземных транспортно-технологических средств / А. П. Парфёнов, Ю. С. Щетинин // Тракторы и сельхозмашины. – 2018. – № 1. – С. 40–46.
3. **ГОСТ 17697–72.** Автомобили. Качение колеса. Термины и определения. – Москва : Изд-во стандартов, 1973. – 24 с.
4. **Тарасик, В. П.** Теория движения автомобиля : учебник для вузов / В. П. Тарасик. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2006. – 478 с.
5. **Тарасик, В. П.** Математическое моделирование прямолинейного движения автомобиля / В. П. Тарасик // Автомобильная промышленность. – 2017. – № 9. – С. 17–22. – № 10. – С. 19–23.
6. **Гришкевич, А. И.** Автомобили. Теория : учебник для вузов / А. И. Гришкевич. – Минск : Вышэйшая школа, 1986. – 208 с.
7. **Смирнов, Г. А.** Теория движения колёсных машин : учебник для вузов / Г. А. Смирнов. – Москва : Машиностроение, 1990. – 352 с.
8. **Литвинов, А. С.** Автомобиль. Теория эксплуатационных свойств : учебник для вузов / А. С. Литвинов, Я. Е. Фаробин. – Москва : Машиностроение, 1989. – 240 с.
9. **Гуськов, В. В.** Тракторы. Теория : учебник для вузов / В. В. Гуськов, Н. Н. Велев, Ю. Е. Атаманов ; под общ. ред. В. В. Гуськова. – Москва : Машиностроение, 1988. – 376 с.
10. **Кравец, В. Н.** Теория автомобиля : учебник для вузов / В. Н. Кравец, В. В. Селифонов. – Москва : Гринлайт, 2011. – 884 с.
11. **Ларин, В. В.** Теория движения полноприводных колёсных машин : учебник для вузов / В. В. Ларин. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. – 391 с.
12. **ГОСТ 22653–77.** Автомобили. Параметры проходимости. Термины и определения. – Москва : Изд-во стандартов, 1977. – 4 с.
13. **Ключев, В. И.** Теория электропривода / В. И. Ключев. – Москва : Энергоатомиздат, 1998. – 704 с.
14. **Копылов, И. П.** Математическое моделирование электрических машин / И. П. Копылов. – Москва : Высшая школа, 1994. – 318 с.

*Статья сдана в редакцию 20 декабря 2018 года*

**Владимир Петрович Тарасик**, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет.  
E-mail: avtobru@gmail.com.

**Vladimir Petrovich Tarasik**, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University.  
E-mail: avtobru@gmail.com.

---

УДК 629.3

*В. П. Тарасик*

## **ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА ДЕМПФИРОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ В СИСТЕМЕ ПОДВЕСКИ АВТОМОБИЛЯ**

---

UDC 629.3

*V. P. Tarasik*

## **PHYSICAL BASICS OF THE PROCESS OF DAMPING OSCILLATIONS IN THE SYSTEM OF VEHICLE SUSPENSION**

---

### **Аннотация**

Изложены результаты исследований влияния релаксационного элемента на виброзащитные свойства подвески автомобиля. Получены амплитудно-частотные характеристики подвески в зависимости от расположения релаксационного элемента в колебательной системе, графики спектральных плотностей ускорений масс и распределения средних квадратических значений ускорений человека на сиденье по октавным полосам частот для двух видов дорог – шоссе с асфальтовым покрытием удовлетворительного качества и шоссе с изношенным бетонным покрытием. Показаны возможности изменения характеристик подвески посредством релаксационного элемента.

### **Ключевые слова:**

автомобиль, подвеска, кузов, рессора, амортизатор, подрессоренная и неподрессоренная массы, сиденье водителя, релаксационный элемент, амплитудно-частотная и фазово-частотная характеристики, октавная полоса частоты, корреляционная функция микропрофиля дороги, спектральная плотность.

### **Abstract**

The research into the effect of the relaxation element on the vibro-protective properties of the vehicle suspension has been conducted and its results are presented. The amplitude-frequency characteristics of the suspension, depending on the location of the relaxation element in the oscillating system have been obtained, as well as the graphs for spectral densities of accelerations of masses and the distribution of root-mean-square values of person's accelerations on the seat in octave frequency bands for the two types of roads, such as highways with asphalt pavement of satisfactory quality and highways with worn out concrete surface. The possibilities of changing suspension characteristics by means of the relaxation element are shown.

### **Keywords:**

vehicle, suspension, body, spring, shock absorber, sprung mass and unsprung mass, driver's seat, relaxation element, amplitude-frequency and phase-frequency characteristics, octave band frequency, correlation function of the road microprofile, spectral density.

---

Движение автомобиля происходит в условиях воздействий на его колёса неровностей опорной поверхности дороги, что приводит к колебаниям кузова, сидений водителя и пассажиров и сопровождается вибрационными нагрузками на организм человека и механизмы автомобиля. Снижению вибрационных нагрузок при создании новой техники уделяется большое внимание.

Одним из способов решения этой проблемы является регулирование демпфирования колебаний подрессоренных масс системы подвески автомобиля.

Американскими учёными Д. Карнопом (D. C. Karnopp) и М. Кросби (M. J. Crosby) в 1973 г. предложен принцип регулирования демпфирования, получивший название semi – active suspensions (полуактивное регулирование) [1].

Д. Карнопф предложил также концепцию плавного изменения демпфирования – skyhook [2]. Аналогичное решение рассматривал в 1965 г. Р. И. Фурунжиев [3].

В процессе исследований и испытаний установлен ряд существенных недостатков таких подвесок. Основной из них – неустойчивость процесса функционирования, обусловленная значительным возрастанием амплитуд колебаний масс при приближении частоты воздействия к собственной частоте колебаний, что приводит к отрыву колёс от дороги, потере автомобилем устойчивости и управляемости.

Для решения возникшей проблемы чешский учёный М. Валашек (M. Valášek) предложил концепцию с названием grondhook [4].

В [5] изложен детальный анализ результатов проведенных её авторами исследований упомянутых принципов регулирования демпфирования колебаний и показана их бесперспективность, поскольку колебательная система подвески оказывается неустойчивой.

В [6] приведена структурная схема подвески с релаксационным элементом. Релаксационный элемент представляет собой совокупность упругого и диссипативного элементов, соединённых между собой последовательно. Он устанавливается в системе подвески между подрессоренной и непрессоренной массами вместо обычного амортизатора параллельно основному упругому элементу, т. е. параллельно рессоре.

Модель релаксационного элемента предложил Максвелл в связи с изучением свойств густых растворов, суспензий и других тел, обладающих свойствами вязкоупругости и ползучести при упругопластических деформациях [7]. Модель Максвелла представляет собой последовательное расположение упругого и демпфирующего элементов. Модели вязкоупругости используются, в частности, для описания физических свойств полимерных материалов, для которых

характерно явление ползучести распространения деформации.

Однако детальный анализ физических свойств приведенной структурной схемы в [6] не проведен. Вместе с тем к этой схеме проявляется интерес многими исследователями [8, 9]. Решение данного вопроса будет рассмотрено далее.

### **Цель исследования**

Исследование физических свойств процесса демпфирования колебаний в системе подвески автомобиля с релаксационным элементом и выявление наиболее рационального его расположения в системе подвески.

### **Методика исследования**

Примем во внимание известное свойство системы подрессоривания кузова, характерное для большинства автомобилей [11]:

$$\rho_y^2 = l_1 l_2, \quad (1)$$

где  $\rho_y$  – радиус инерции кузова относительно его поперечной оси, проходящей через центр масс;  $l_1, l_2$  – координаты центра масс кузова автомобиля относительно осей вращения передних и задних колёс соответственно.

При выполнении условия (1) можно использовать модель колебаний масс системы подвески отдельно для передней и задней частей автомобиля. Принятые к исследованию динамические модели систем подвесок приведены на рис. 1.

Модель на рис. 1, а обычная и не содержит релаксационного элемента (РЭ). В модели на рис. 1, б РЭ расположен между подрессоренной  $m_{\text{п}}$  и непрессоренной  $m_{\text{н}}$  массами параллельно упругому элементу подвески кузова (рессоре) с коэффициентом жёсткости  $c_p$ . В модели на рис. 1, в РЭ

установлен между массой сиденья водителя  $m_c$  и подрессоренной массой кузова  $m_{II}$  параллельно упругому элементу сиденья с коэффициентом жёсткости  $c_c$ . В обозначениях параметров релаксационного элемента использован индекс «р.э». Величину массы РЭ  $m_{p.э}$  составляет суммарная масса штока и

поршня гидравлического цилиндра РЭ. В состав РЭ входят упругий элемент с коэффициентом жёсткости  $c_{p.э}$  и диссипативный элемент с коэффициентом демпфирования  $\mu_{p.э}$ . Параметры шины – коэффициент жёсткости  $c_{III}$  и коэффициент демпфирования  $\mu_{III}$ .

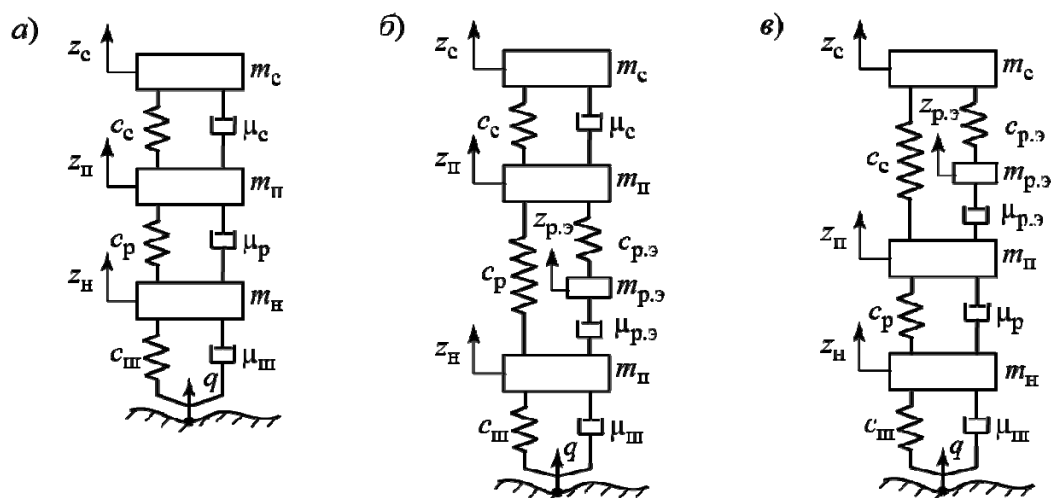


Рис. 1. Динамические модели систем подвесок автомобиля: а – без релаксационного элемента; б – с релаксационным элементом в подвеске кузова; в – с релаксационным элементом в подвеске сиденья водителя

Составим дифференциальные уравнения движения масс рассматриваемых вариантов подвески и представим их в структурированном виде относительно

фазовых координат и их производных. Математическая модель системы без РЭ (см. рис. 1, а) имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} m_H \ddot{z}_H + (\mu_{III} + \mu_p) \dot{z}_H + (c_{III} + c_p) z_H - \mu_p \dot{z}_{II} - c_p z_{II} &= \mu_{III} \dot{q} + c_{III} q; \\ m_{II} \ddot{z}_{II} + (\mu_p + \mu_c) \dot{z}_{II} + (c_p + c_c) z_{II} - \mu_p \dot{z}_H - c_p z_H - \mu_c \dot{z}_c - c_c z_c &= 0; \\ m_c \ddot{z}_c + \mu_c \dot{z}_c + c_c z_c - \mu_c \dot{z}_{II} - c_c z_{II} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $z_i, \dot{z}_i, \ddot{z}_i; i = H, II, c$  – координаты, скорости и ускорения масс соответственно;  $q, \dot{q}$  – функции воздействий неровностей опорной поверхности дороги (ордината микропрофиля дороги и

её производная).

Дифференциальные уравнения движения масс подвески с релаксационным элементом, согласно рис. 1, б:



$$\left. \begin{aligned} m_H \ddot{z}_H + (\mu_{ш} + \mu_{p.э}) \dot{z}_H + (c_{ш} + c_p) z_H - c_p z_{п} - \mu_{p.э} \dot{z}_{p.э} &= \mu_{ш} \dot{q} + c_{ш} q; \\ m_{п} \ddot{z}_{п} + \mu_c \dot{z}_{п} + (c_p + c_c + c_{p.э}) z_{п} - c_p z_H - \mu_c \dot{z}_c - c_c z_c - c_{p.э} \dot{z}_{p.э} &= 0; \\ m_c \ddot{z}_c + \mu_c \dot{z}_c + c_c z_c - \mu_c \dot{z}_{п} - c_c z_{п} &= 0; \\ m_{p.э} \ddot{z}_{p.э} + \mu_{p.э} \dot{z}_{p.э} + c_{p.э} z_{p.э} - \mu_{p.э} \dot{z}_H + c_{p.э} z_{п} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Дифференциальные уравнения движения масс системы, представленной на рис. 1, в:

$$\left. \begin{aligned} m_H \ddot{z}_H + (\mu_{ш} + \mu_p) \dot{z}_H + (c_{ш} + c_p) z_H - \mu_p \dot{z}_{п} - c_p z_{п} &= \mu_{ш} \dot{q} + c_{ш} q; \\ m_{п} \ddot{z}_{п} + (\mu_p + \mu_{p.э}) \dot{z}_{п} + (c_p + c_c) z_{п} - \mu_p \dot{z}_H - c_p z_H - c_c z_c - \mu_{p.э} \dot{z}_{p.э} &= 0; \\ m_c \ddot{z}_c + (c_c + c_{p.э}) z_c - c_c z_{п} - c_{p.э} z_{p.э} &= 0; \\ m_{p.э} \ddot{z}_{p.э} + \mu_{p.э} \dot{z}_{p.э} + c_{p.э} z_{p.э} - \mu_{p.э} \dot{z}_{п} + c_{p.э} z_c &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

В уравнения (2)–(4) фазовые координаты  $z_H, z_{п}, z_c, z_{p.э}$  и их производные входят в первой степени. Следовательно, это линейные дифференциальные уравнения, а коэффициенты при фазовых координатах и их производных представляют собой элементы матрицы Якоби. По спектру матрицы Якоби линейных дифференциальных уравнений можно оценить устойчивость системы и вид переходных процессов [10]. Уравнение переходного процесса линейной динамической системы

$$z(t) = \sum_{i=1}^n z_i(t) = \sum_{i=1}^n C_i e^{\lambda_i t}, \quad (5)$$

где  $z_i(t)$  –  $i$ -я составляющая функции  $z(t)$ ;  $C_i$  – постоянные интегрирования дифференциальных уравнений, определяемые из начальных условий;  $\lambda_i$  – собственные значения матрицы Якоби – комплексные числа, содержащие вещественные  $\text{Re} \lambda_i$  и мнимые  $\text{Im} \lambda_i$  части:

$$\lambda_i = \text{Re} \lambda_i + j \text{Im} \lambda_i; \quad i = \overline{1, n}, \quad (6)$$

$n$  – порядок матрицы Якоби;  $j = \sqrt{-1}$  – мнимая единица.

Согласно теореме А. М. Ляпунова, для устойчивости линейной системы необходимо и достаточно, чтобы вещественные части всех собственных значений матрицы Якоби системы уравнений математической модели были отрицательны [10]. В этом случае переходная характеристика  $z(t)$  и все её составляющие  $z_i(t)$  будут затухающими.

Элементы матрицы Якоби зависят только от параметров динамической системы. Для системы подвески автомобиля их значения определяются параметрами инерционных, упругих и диссипативных элементов  $m_i, c_i, \mu_i, i = H, п, c, p.э$ .

Для исследуемых моделей подвески приняты следующие значения параметров:  $m_H = 55$  кг;  $m_{п} = 1850$  кг;  $m_c = 80$  кг;  $m_{p.э} = 1$  кг;  $c_{ш} = 460000$  Н/м;  $c_p = 35000$  Н/м;  $c_c = 11000$  Н/м. Параметры диссипативных элементов задавались в виде относительных коэффициентов затухания колебаний  $\gamma$ , а затем на основе парциальных моделей определялись значения коэффициентов демпфирования  $\mu$  [10, 11]. Для амортизатора подвески кузова принято значение  $\gamma_p = 0,25$ ; для амортизатора сиденья –  $\gamma_c = 0,15$ .

Для релаксационного элемента

модели на рис. 1, б приняты значения  $c_{p,э} = 25000$  Н/м,  $\gamma_{p,э} = 0,5$ , а модели на рис. 1, в –  $c_{p,э} = 8000$  Н/м,  $\gamma_{p,э} = 1,0$ . Значения  $c_{p,э}$  и  $\gamma_{p,э}$  подбирались в процессе сравнительных расчётов с учё-

том их влияния на оценочные показатели качества подвески.

Полученные спектры собственных значений матрицы Якоби приведены в табл. 1.

Табл. 1

Спектр собственных значений матрицы Якоби		
Модель на рис. 1, а	Модель на рис. 1, б	Модель на рис. 1, в
$-0,155 \pm j 4,145$	$-0,299 \pm j 4,209$	$-0,120 \pm j 4,184$
$-1,804 \pm j 11,876$	$-1,809 \pm j 11,885$	$-0,948 \pm j 15,546$
$-10,901 \pm j 94,325$	$-4,664 \pm j 96,378$	$-10,901 \pm j 94,324$
	$-16,750$	$-2,548$
	$-1394,3$	$-1833,5$

Из табл. 1 следует, что во всех рассматриваемых вариантах структуры подвески обеспечивается устойчивость процессов колебаний. В каждом варианте три пары комплексно-сопряженных значений, отображающие затухающие колебательные составляющие  $z_i(t)$  переходной характеристики  $z(t)$ . При введении релаксационного элемента появляются дополнительно две экспоненциальные составляющие. Мнимые части комплексно-сопряженных собственных значений представляют резонансные частоты системы, рад/с. Если вычислить собственные значения матрицы Якоби без учёта диссипативных элементов, получим собственные частоты системы. Их значения незначительно отличаются от резонансных частот (они обычно выше на 2...3 %). У исследуемых вариантов подвески низшая резонансная частота

находится в пределах 0,6...0,7 Гц, вторая – 1,9...2,3 Гц, а высшая – 15,0...15,3 Гц.

Для оценки вибронгрузок в системе подвески в зависимости от её структуры и влияния дорожных условий осуществлялось моделирование вероятностных характеристик микропрофиля дороги, определение спектральных плотностей ускорений подрессоренной массы и сиденья и средних квадратических значений ускорений этих масс. Рассматривались два вида дорог – асфальтированное шоссе в удовлетворительном состоянии и шоссе с изношенным бетонным покрытием. Моделирование дорожных воздействий осуществлялось посредством корреляционных функций микропрофиля. Использовалось выражение корреляционной функции [12, 13]

$$R_q(x_s) = \sigma_q^2 (A_1 e^{-\alpha_1 |x_s|} + A_2 e^{-\alpha_2 |x_s|} \cos \beta_2 x_s + A_3 e^{-\alpha_3 |x_s|} \cos \beta_3 x_s), \quad (7)$$

где  $\sigma_q^2$  – дисперсия ординат неровностей микропрофиля дороги,  $m^2/c^4$ ;  $A_1, A_2, A_3$  – коэффициенты, характеризующие рас-

пределение дисперсии ординат между составляющими корреляционной функции;  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  – параметры, характеризующие быстроту затухания корреляци-

онной связи ординат микропрофиля,  $m^{-1}$ ;  $\beta_2, \beta_3$  – волновые частоты гармонических составляющих микропрофиля,  $m^{-1}$ ;  $x_s$  – аргумент корреляционной функции:  $x_s = \Delta x n$ ;  $\Delta x$  – шаг дискретизации перемещения автомобиля, м;  $n$  – количество интервалов сдвига аргумента по пути  $x$ .

Параметры корреляционной функции микропрофиля асфальтированного шоссе: среднее квадратическое значение ординат микропрофиля  $\sigma_q = 0,01$  м;  $A_1 = 0,8$ ;  $A_2 = 0,15$ ;  $A_3 = 0,05$ ;  $\alpha_1 = 0,2$ ;  $\alpha_2 = 0,05$ ;  $\alpha_3 = 0,05$ ;  $\beta_2 = 0,6$ ;  $\beta_3 = 2,0$ ; скорость движения  $v_a = 120$  км/ч; шоссе с изношенной бетонкой:  $\sigma_q = 0,0195$  м;  $A_1 = 0,75$ ;  $A_2 = 0,15$ ;  $A_3 = 0,10$ ;  $\alpha_1 = 0,6$ ;  $\alpha_2 = 0,12$ ;  $\alpha_3 = 0,35$ ;  $\beta_2 = 1,2$ ;  $\beta_3 = 4,5$ ; скорость движения  $v_a = 60$  км/ч.

На основании корреляционной функции формировался вектор случайной последовательности ординат микропрофиля  $q_i(x), i = \overline{1, N}$ , где  $N$  – количество элементов вектора, а также определялась функция спектральной плотности ординат  $G_q(v)$  [11, 12].

При определении критериев эффективности подвески автомобиля на основе спектрального метода необхо-

димо располагать функциями спектральных плотностей ускорений подвесочных масс. Эти функции связаны с функцией  $G_q(v)$  амплитудно-частотными характеристиками (АЧХ), для определения которых нужно получить передаточные функции колебательной системы автомобиля. Рассмотрим кратко методику определения АЧХ.

Дифференциальные уравнения колебаний (2)–(4) линейные, к ним применимо преобразование Лапласа, посредством которого они превращаются в систему алгебраических уравнений, аргументом которых становится комплексная переменная  $s = \alpha + jv$ . Поскольку аргументом функции  $G_q(v)$  является круговая частота  $v$ , то под воздействием неровностей дороги в колебательной системе установятся вынужденные незатухающие колебания с переменными амплитудами, но с частотой внешнего воздействия  $v$ . Поэтому для определения частотных характеристик этих колебаний заменим комплексную переменную  $s$  её мнимой составляющей  $jv$ .

В качестве примера приведём систему алгебраических уравнений для модели с релаксационным элементом в подвеске сиденья, описывающую её частотные характеристики. На основе уравнений (4) получаем

$$\left. \begin{aligned} & [(c_{ш} + c_p) - m_H v^2 + j(\mu_{ш} + \mu_p)v] Z_H(jv) - [c_p + j\mu_p v] Z_{п}(jv) = [c_{ш} + j\mu_{ш} v] Q(jv); \\ & - [c_p + j\mu_p v] Z_H(jv) + [(c_p + c_c) - m_{п} v^2 + j(\mu_p + \mu_{п.э})v] Z_{п}(jv) - \\ & \quad - [c_c] Z_c(jv) - [j\mu_{п.э} v] Z_{п.э}(jv) = 0; \\ & - [c_c] Z_{п}(jv) + [(c_c + c_{п.э}) - m_c v^2] Z_c(jv) - [c_{п.э}] Z_{п.э}(jv) = 0; \\ & - [j\mu_{п.э} v] Z_{п}(jv) - [c_{п.э}] Z_c(jv) + [c_{п.э} - m_{п.э} v^2 + j\mu_{п.э} v] Z_{п.э}(jv) = 0, \end{aligned} \right\} (8)$$

где  $Z_H(jv), Z_{п}(jv), Z_c(jv), Z_{п.э}(jv)$  – частотные характеристики случайных

функций  $z_H(t), z_{п}(t), z_c(t), z_{п.э}(t)$  – ординат колебаний масс, изменяемых

во времени  $t$ ;  $Q(j\nu)$  – частотная характеристика функции ординат микропрофиля  $q(t)$ .

Уравнения (8) позволяют определить частотные характеристики колебательной системы и установить зависимости амплитуд, скоростей и ускорений масс от частоты воздействия  $\nu$ . Частотная характеристика  $W_{zi}^q(j\nu)$  колебаний массы  $m_i$  определяется отношением частотной характеристики её перемещения  $Z_i(j\nu)$  к частотной характеристике  $Q(j\nu)$  воздействия  $q(t)$ :

$$W_{zi}^q(j\nu) = Z_i(j\nu)/Q(j\nu). \quad (9)$$

Непосредственное вычисление частотных характеристик колебаний масс системы выполняется на основе выражения

$$W_{zi}^q(j\nu) = \Delta_{zi}(j\nu)/\Delta(j\nu), \quad (10)$$

где  $\Delta(j\nu)$  – главный определитель системы уравнений (8);  $\Delta_{zi}(j\nu)$  – определитель, у которого столбец коэффициентов при  $Z_i(j\nu)$  заменён столбцом коэффициентов при  $Q(j\nu)$ .

Для вычисления главного определителя  $\Delta(j\nu)$  используется матрица коэффициентов при частотных характеристиках колебаний масс системы  $Z_H(j\nu), Z_{II}(j\nu), Z_C(j\nu), Z_{P.Э}(j\nu)$  в системе уравнений (8). В рассматриваемом примере эта матрица имеет вид:

$$A = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{vmatrix}. \quad (11)$$

Элементы  $a_{ik}$  матрицы  $A$  – комплексные числа. Выпишем в качестве примера выражения для вычисления

элементов первой строки матрицы  $A$ :

$$a_{11} = (c_{ш} + c_p - m_H \nu^2) + j(\mu_{ш} + \mu_p)\nu;$$

$$a_{12} = -(c_p + j\mu_p\nu); \quad a_{13} = 0; \quad a_{14} = 0.$$

Составим матрицу  $B_{zII}$ , предназначенную для вычисления определителя  $\Delta_{zII}(j\nu)$ , соответствующего частотной характеристике колебаний подрессоренной массы  $m_{II}$ . Для этого в матрице  $A$  заменим столбец коэффициентов при  $Z_{II}(j\nu)$ , т. е. второй столбец, вектор-столбцом  $B_q$  коэффициентов при внешних воздействиях  $Q(j\nu)$ :

$$B_q = (b_{q1}, b_{q2}, b_{q3}, b_{q4})^T. \quad (12)$$

В рассматриваемом примере  $b_{q1} = c_{ш} + j\mu_{ш}\nu$ ;  $b_{q2} = b_{q3} = b_{q4} = 0$ , а матрица  $B_{zII}$  имеет вид:

$$B_{zII} = \begin{vmatrix} a_{11} & b_{q1} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & b_{q2} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & b_{q3} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & b_{q4} & a_{43} & a_{44} \end{vmatrix}. \quad (13)$$

Вычислив определители матриц  $A$  и  $B_{zII}$ , искомую частотную характеристику  $W_{zII}^q(j\nu)$  найдем из соотношения

$$W_{zII}^q(j\nu) = \Delta_{zII}(j\nu)/\Delta(j\nu), \quad (14)$$

где  $\Delta_{zII}(j\nu)$  – определитель матрицы  $B_{zII}$ ;  $\Delta(j\nu)$  – определитель матрицы  $A$ .

Частотную характеристику  $W_{zII}^q(j\nu)$  представим в виде

$$W_{zII}^q(j\nu) = U_{zII}(\nu) + jV_{zII}(\nu), \quad (15)$$

где  $U_{zII}(\nu)$  – вещественная часть частотной характеристики  $W_{zII}^q(j\nu)$ ;

$V_{zп}(v)$  – мнимая её часть.

АЧХ колебаний любой массы динамической системы  $A_{zi}^q(v)$  представляет собой модуль её частотной характеристики  $|W_{zi}^q(jv)|$ , а её значения определяются из выражения

$$A_{zi}^q(v) = |W_{zi}^q(jv)| = \sqrt{U_{zi}^2(v) + V_{zi}^2(v)}. \quad (16)$$

АЧХ ускорений  $i$ -й массы динамической системы  $A_{zi}^q(v)$  вычисляется из соотношения

$$A_{zi}^q(v) = v^2 A_{zi}^q(v). \quad (17)$$

Для оценки вибрационных нагрузок в системе подвески определяются спектральные плотности ускорений её масс и вычисляются средние квадратические значения ускорений (СКЗУ) поддресоренных масс. Спектральную плотность ускорений масс виброзащитной системы можно найти по формуле

$$G_{zi}(v) = [A_{zi}^q(v)]^2 v^4 G_q(v), \quad (18)$$

где  $A_{zi}^q(v)$  – АЧХ вертикальных перемещений  $i$ -й массы;  $G_q(v)$  – спектральная плотность ординат микропрофиля дороги.

Оценку вибрационных нагрузок на человека осуществляют по СКЗУ в первых пяти октавных полосах частот  $\sigma_i, i = \overline{1, n}$  и по скорректированному по частоте СКЗУ  $\sigma_k$ , учитывающему чувствительность человека к вибрациям в различных октавах. Значение  $\sigma_i$  вычисляют по формуле

$$\sigma_i = \sqrt{D_i} = \sqrt{\int_{v_{ni}}^{v_{ki}} G_{zс}^q(v) dv}, \quad (19)$$

где  $D_i$  – дисперсия вертикальных ускорений человека на сиденье в  $i$ -й октавной полосе частот;  $G_{zс}^q$  – спектральная плотность ускорения на сиденье;  $v_{ni}, v_{ki}$  – начальная и конечная частоты  $i$ -й октавной полосы.

Корректированное по частоте СКЗУ

$$\sigma_k = \sqrt{\sum_{i=1}^n (k_i \sigma_i)^2}, \quad (20)$$

где  $k_i$  – весовой коэффициент чувствительности человека к ускорениям в  $i$ -й октавной полосе частот [11].

### Результаты исследования

На рис. 2, *а–в* представлены графики АЧХ перемещения поддресоренных  $A_{zп}^q(v)$  и неподдресоренных масс  $A_{zн}^q(v)$  соответственно для обычной подвески (*а*) и подвесок с релаксационным элементом (*б*) и (*в*). Размерность частоты  $v$  на всех графиках здесь и далее выражена в герцах, а обозначение аргумента  $v$  сохранено.

Из сопоставления полученных характеристик видно, что применение РЭ в подвеске кузова (динамическая модель на рис. 1, *б*) существенно снижает  $A_{zп}^q(v)$ , но при этом значительно возрастает АЧХ перемещения неподдресоренной массы  $A_{zн}^q(v)$  (см. рис. 2, *б*). Это означает, что могут возникать большие амплитуды колебаний нормальной реакции дороги, в результате ухудшится связь колёс с дорогой и снизится устойчивость автомобиля против заноса. Графики АЧХ поддресоренных и неподдресоренных масс на рис. 2, *а, в* практически одинаковы. Следовательно, установка РЭ в подвеске сиденья не влияет на амплитуды перемещения этих масс.

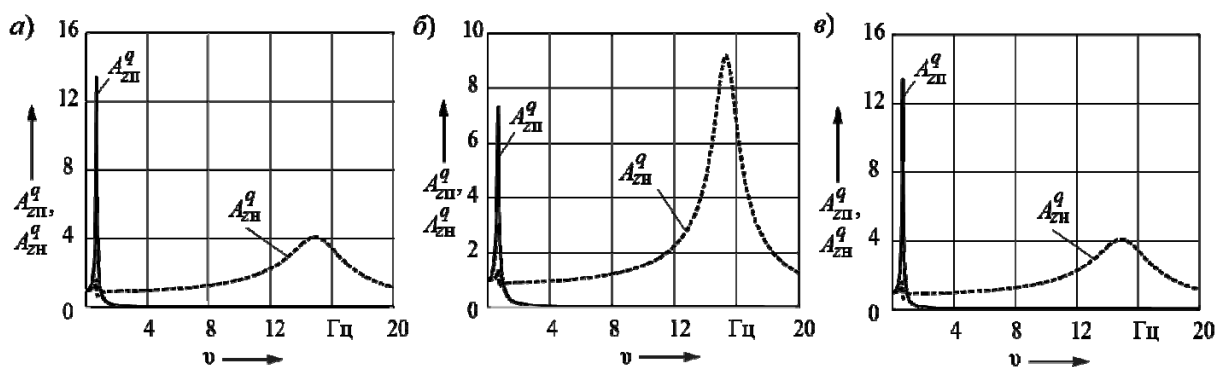


Рис. 2. АЧХ перемещения поддрессоренной и неподдрессоренной масс подвески: *а* – без РЭ; *б* – РЭ в подвеске кузова; *в* – РЭ в подвеске сиденья

АЧХ перемещения сиденья показаны на рис. 3, *а–в*. Расположение РЭ в подвеске сиденья слабо влияет на величину  $A_{zc}^q(v)$ . Происходит лишь сдвиг её экстремумов в сторону больших зна-

чений частоты. При установке же РЭ в подвеске кузова обеспечивается снижение пикового значения  $A_{zc}^q(v)$  на низкой частоте (см. рис. 3, *б*).

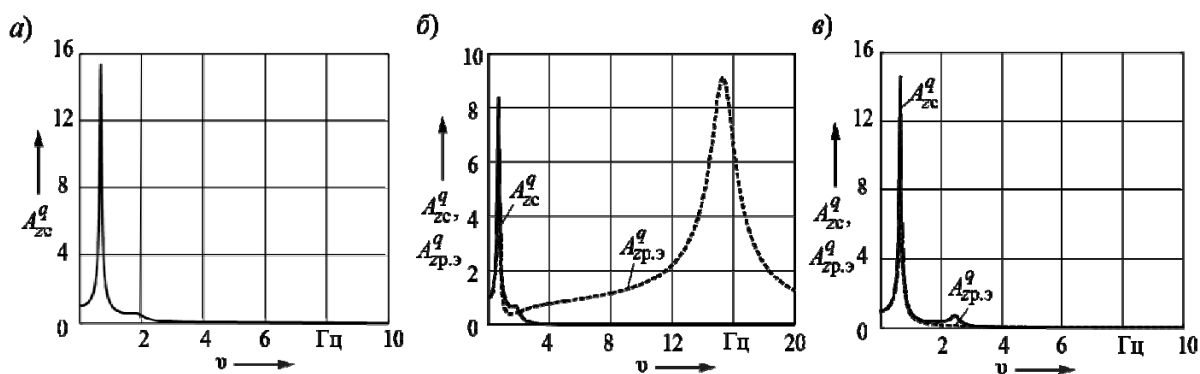


Рис. 3. АЧХ перемещения сиденья: *а* – без РЭ; *б* – РЭ в подвеске кузова; *в* – РЭ в подвеске сиденья

На рис. 3, *б, в* изображены также АЧХ перемещения массы релаксационного элемента  $A_{zр.э}^q(v)$ . Их значения сопоставимы с АЧХ  $A_{zc}^q(v)$ . График  $A_{zр.э}^q(v)$  на рис. 3, *б* имеет два пиковых значения – на низшей и высшей резонансных частотах, а на рис. 3, *в* – только на низшей частоте.

На рис. 4, *а–в* приведены графики АЧХ ускорения поддрессоренной массы

$A_{zп}^q(v)$ , из которых следует, что при установке РЭ в подвеске кузова можно обеспечить снижение ускорения поддрессоренной массы кузова. При этом пиковое значение  $A_{zп}^q(v)$  на низшей частоте снижается, а на высшей – возрастает (рис. 4, *б*). Это положительно сказывается на плавности хода автомобиля и снижении вибрационных нагрузок на человека в области низких частот (до 4...6 Гц), наиболее неблагоприят-

ных для человека [10]. Из рис. 5, б видно, что на двух низших резонансных частотах в подвеске с РЭ АЧХ ускорения на сиденье  $A_{zс}^q(\nu)$  уменьшится в два и более раза.

Графики АЧХ ускорения сиденья показаны на рис. 5, а–в. При установке

РЭ в подвеске сиденья пиковые значения АЧХ ускорения  $A_{zс}^q(\nu)$  на низших резонансных частотах смещаются в сторону более высоких частот (см. рис. 5, в). При этом возрастает АЧХ на второй резонансной частоте, но на низшей частоте её значение не снижается.

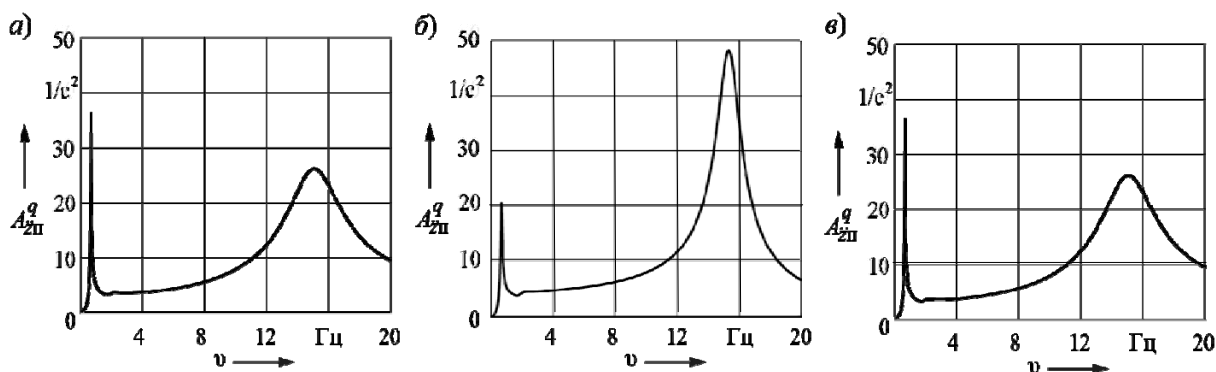


Рис. 4. АЧХ ускорения подрессоренной массы

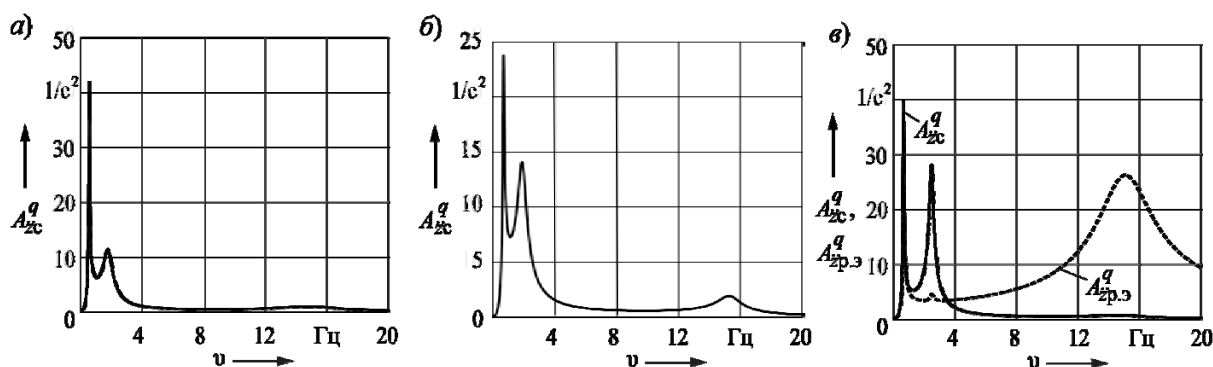


Рис. 5. АЧХ ускорения сиденья

На рис. 5, в штрихпунктирной линией изображена АЧХ ускорения массы релаксационного элемента  $A_{zр.э}^q(\nu)$ . Максимальные её значения получаются на двух резонансных частотах – низшей и высшей. При частоте 15 Гц значение  $A_{zр.э}^q(\nu)$  составляет 26  $1/c^2$ . В варианте же с РЭ в подвеске кузова масса РЭ может иметь значительно большее ускорение. Так, при значениях параметров РЭ, использованных в рассматриваемых

примерах, АЧХ ускорения  $A_{zр.э}^q(\nu)$  массы РЭ на высшей резонансной частоте (15 Гц) достигает 85000  $1/c^2$  (график  $A_{zр.э}^q(\nu)$  на рис. 5, б не изображён). Ускорение непрорессоренной массы  $A_{zп}^q(\nu)$  на этой же частоте в данном варианте подвески в два с лишним раза выше, чем в противопоставляемых вариантах (рис. 6, а–в).

Полученные результаты показы-

вают, что применение РЭ в подвеске кузова позволяет снизить вибрационные нагрузки на поддресоренную массу и человека в области низких частот воздействия дороги. Установка же РЭ в подвеске сиденья неэффективна.

На рис. 7 приведены фазовые частотные характеристики (ФЧХ) колеба-

ния масс подвесок. Они представляют собой разности фаз (углов сдвига по фазе) графиков колебаний масс относительно графика изменения воздействия (ординат микропрофиля дороги) в зависимости от частоты  $\nu$ .

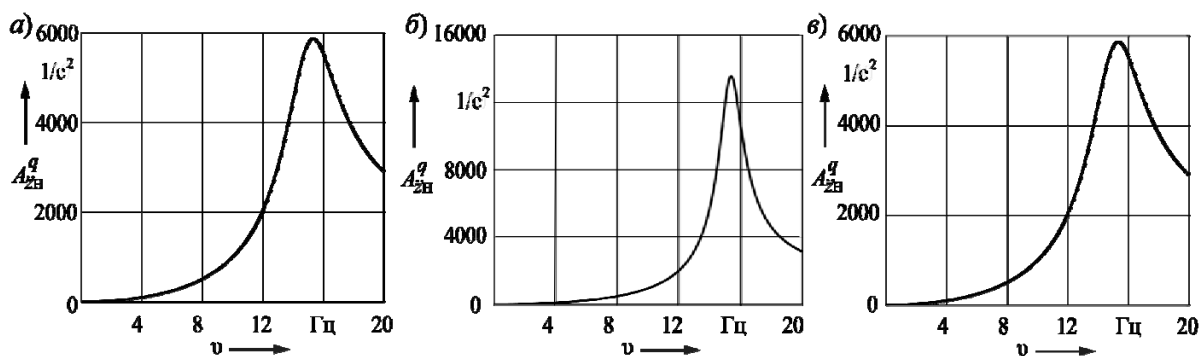


Рис. 6. АЧХ ускорения неподдресоренной массы

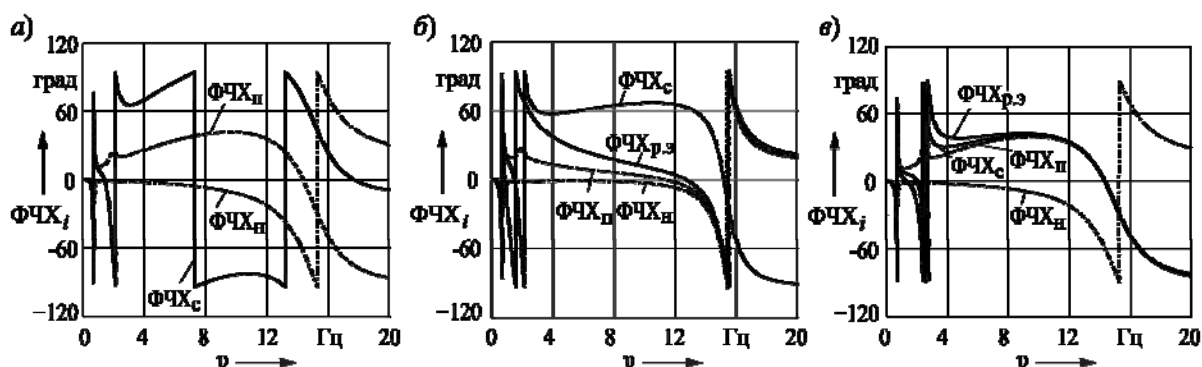


Рис. 7. ФЧХ колебания масс подвески

Приняты следующие обозначения характеристик на рис. 7, а–в: сдвиг по фазе поддресоренной массы ФЧХ<sub>п</sub>; неподдресоренной массы ФЧХ<sub>н</sub>; массы сиденья ФЧХ<sub>с</sub>; массы релаксационного элемента ФЧХ<sub>р.э</sub>. Низшая резонансная частота системы подвески в рассматриваемых вариантах находится в пределах 0,66...0,67 Гц, вторая – 1,9...2,5 Гц, высшая – 15,0...15,3 Гц (в табл. 1 резонансные частоты приведены в радианах в секунду). При прохождении области

резонанса сдвиг по фазе резко изменяется на 180 град.

В области двух первых резонансных частот фазово-частотные характеристики сравниваемых вариантов подвески практически одинаковы, но различаются в области средних частот в диапазоне 4...15 Гц.

Сравним вначале ФЧХ первого и третьего вариантов подвески (см. рис. 7, а, в). Графики ФЧХ<sub>н</sub> и ФЧХ<sub>п</sub> этих вариантов практически



одинаковы. Графики ФЧХс и ФЧХр.э при установке РЭ в подвеске сиденья по мере увеличения частоты быстро сближаются между собой и с ФЧХп. Заметно различаются они лишь в небольшом интервале частот (3...6 Гц).

При расположении же РЭ в подвеске кузова ФЧХ всех масс значительно различаются (см. рис. 7, б). Угол сдвига фаз между ФЧХс и ФЧХн составляет примерно 60 град, причем ФЧХс опережает ФЧХн, а ФЧХп быстро приближается к графику ФЧХн. Отмеченные особенности протекания графиков ФЧХп и ФЧХс объясняют существенные изменения АЧХ ускорений поддресоренной массы и сиденья при

использовании релаксационного элемента в подвеске кузова, графики которых изображены на рис. 4, б и 5, б. Их значения снижаются, а экстремумы сдвигаются в сторону второго резонанса и средних значений частот. Величина сдвига зависит от выбора параметров релаксационного элемента  $c_{p.э}$  и  $\gamma_{p.э}$ .

На рис. 8, 9 и 10 представлены графики спектральных плотностей ускорений соответственно поддресоренной массы  $G_{\ddot{z}_n}(\nu)$ , сиденья  $G_{\ddot{z}_c}(\nu)$  и неподдресоренной массы  $G_{\ddot{z}_h}(\nu)$  в зависимости от частоты воздействия микропрофиля дороги  $\nu$ .

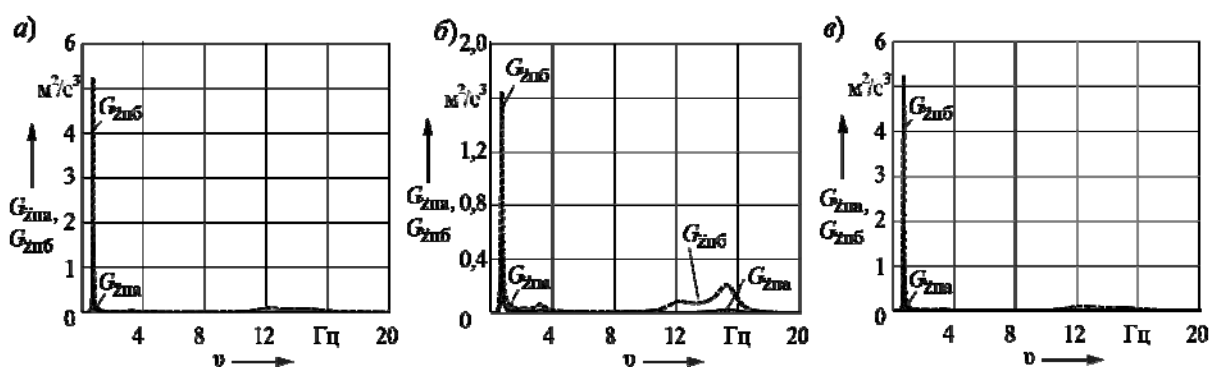


Рис. 8. Спектральная плотность ускорения поддресоренной массы подвески: а – без РЭ; б – РЭ в подвеске кузова; в – РЭ в подвеске сиденья

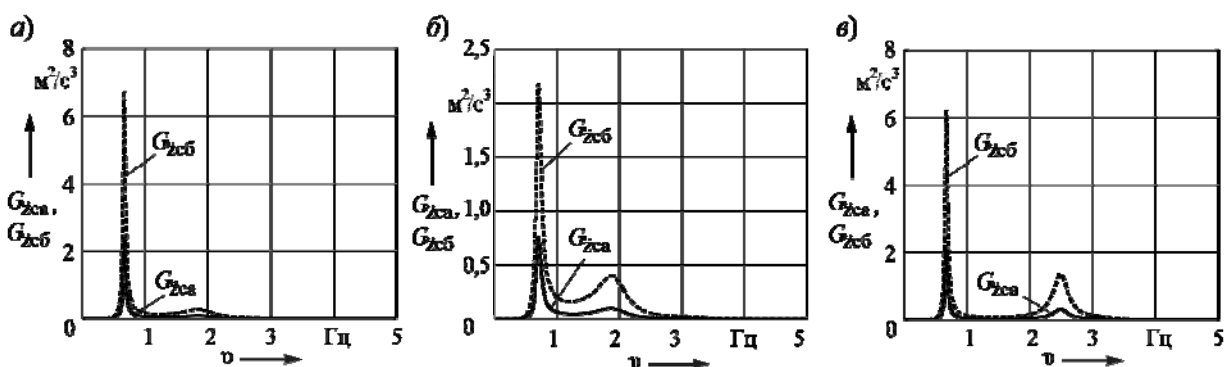


Рис. 9. Спектральная плотность ускорения сиденья: а – подвеска без РЭ; б – РЭ в подвеске кузова; в – РЭ в подвеске сиденья

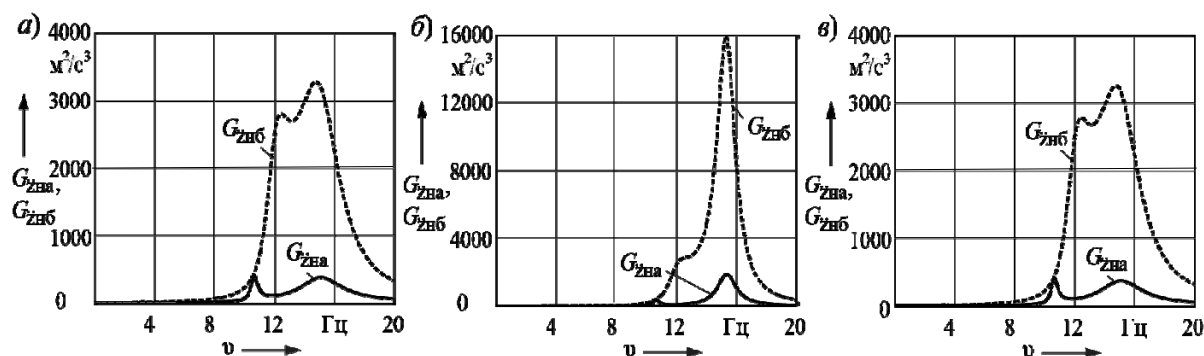


Рис. 10. Спектральная плотность ускорения неподдресоренной массы подвески: а – без РЭ; б – РЭ в подвеске кузова; в – РЭ в подвеске сиденья

Графики получены для движения по асфальтированному шоссе (сплошные линии) и по шоссе с изношенным бетонным покрытием (штриховые линии). Скорость движения автомобиля в первом случае равна 120 км/ч, а во втором – 60 км/ч. Очевидно, что спектральные плотности ускорения на изношенном шоссе значительно выше, несмотря на более низкую скорость движения.

Спектральная плотность в областях вокруг резонансных частот резко возрастает, особенно на низшей резонансной частоте. Вместе с тем, как следует из полученных графиков, применение релаксационного элемента в подвеске кузова способствует снижению спектральной плотности на низшей частоте за счёт смещения энергии воздействий на массы подвески в область более высоких частот (см. рис. 8, б и 9, б). Спектральная плотность ускорения массы сиденья на высшей частоте (в исследуемых примерах 14...15 Гц) практически не зависит от расположения РЭ, т. к. энергия колебаний на этой частоте эффективно поглощается демпфирующими устройствами подвески.

Спектральная плотность ускорений неподдресоренной массы распределена в высокочастотном диапазоне при частотах 10...20 Гц (см. рис. 10, а–в). Её значения также зависят от расположе-

ния РЭ. При расположении РЭ в подвеске сиденья он не влияет на  $G_{\ddot{z}_H}(\nu)$ , а при установке в подвеске кузова значение  $G_{\ddot{z}_H}(\nu)$  существенно возрастает (см. рис. 10, б).

Для интегральной оценки виброзащитных свойств подвески используются следующие показатели: скорректированное по частоте СКЗУ  $\sigma_K$  на сиденье водителя и СКЗУ поддресоренной массы  $\sigma_{\ddot{z}_H}$  в низкочастотном диапазоне частот 0...20 Гц. Значения  $\sigma_K$  вычисляются по формуле (20), а  $\sigma_{\ddot{z}_H}$  – по формуле (19), принимая в ней значения  $\nu_{Hi} = 0$  и  $\nu_{Vi} = 20$  Гц. Значения  $\nu_{Hi}$  и  $\nu_{Vi}$  подставляются в радианах в секунду.

Графики распределения средних квадратических значений ускорений (СКЗУ) колебаний сиденья водителя в первых пяти октавных полосах частот для рассматриваемых вариантов подвесок представлены на рис. 11, а–в. СКЗУ, соответствующие движению по асфальтированному шоссе, обозначены  $\sigma_{\ddot{z}_a}$  и изображены сплошными линиями, а при движении по изношенному бетону  $\sigma_{\ddot{z}_б}$  – штриховыми. Графики, обозначенные  $\sigma_{\text{доп}}$ , относятся к предельным СКЗУ для 8-часовой рабочей смены согласно ГОСТ 12.1.012–90.

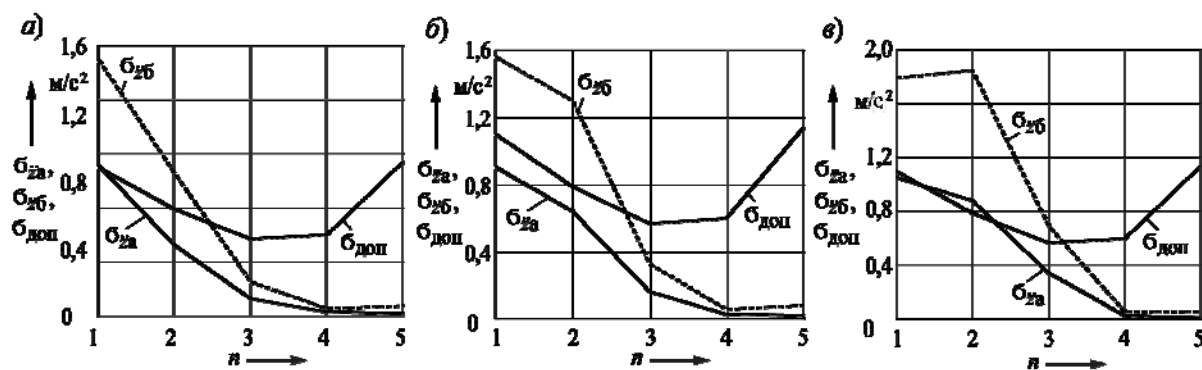


Рис. 11. Графики СКЗУ сиденья водителя в октавных полосах частот: а – подвеска без РЭ; б – РЭ в подвеске кузова; в – РЭ в подвеске сиденья

Сравнивая между собой приведенные графики, можно отметить, что применение релаксационного элемента в подвеске автомобиля влечет за собой увеличение СКЗУ во второй и третьей октавных полосах частот, что обусловлено смещением пиковых значений спектральной плотности ускорения сиденья в сторону увеличения частоты воздействия дороги (см. рис. 5, а–в). Третья октавная полоса соответствует интервалу частот 2,8...5,6 Гц, оказывающих наиболее неблагоприятное влия-

ние на человека, что учитывается в формуле (20) коэффициентом чувствительности  $k_i$ . В третьей и четвертой октавах его значение наибольшее.

Полученные значения показателей приведены в табл. 2. Предельно допускаемые их величины установлены в процессе испытаний автомобилей на динамометрических участках дорог автополигона НИЦИАМТ (г. Дмитров, РФ). Расчётные оценки не должны превышать их значений [11, 12].

Табл. 2

Показатель	Значение показателя		
	Модель на рис. 1, а	Модель на рис. 1, б	Модель на рис. 1, в
СКЗУ кузова:			
асфальтированное шоссе	1,1625	1,1013	1,1635
изношенное бетонное шоссе	2,4402	2,5280	2,4426
Корректированное СКЗУ сиденья:			
асфальтированное шоссе	1,0919	1,1155	1,5397
изношенное бетонное шоссе	2,0415	2,1350	2,9915

Согласно полученным результатам, для рассмотренных вариантов подвесок с принятыми значениями их параметров релаксационный элемент не обеспечивает улучшения виброзащиты кузова, а при установке его в подвеске сиденья ухудшает корректированное СКЗУ, воздей-

ствующее на человека. Соотношение принятых параметров подвески в проведенных исследованиях характерно для легковых автомобилей, у которых низшая частота собственных колебаний  $\nu_1$  находится в пределах 0,7...1,3 Гц. У грузовых автомобилей  $\nu_1 = 1,2...1,8$  Гц,

у тракторов и строительно-дорожных машин  $v_1 = 2...3$ . Применение релаксационного элемента в подвеске подрессоренной массы для таких машин может оказаться эффективным.

### Выводы

1. На основе математического моделирования выполнены исследования физических свойств подвески автомобиля с релаксационным элементом. Определены оценки эффективности установки релаксационного элемента в подвеске кузова и в подвеске сиденья водителя.

2. Применение релаксационного элемента приводит к сдвигу графиков спектральной плотности подрессоренных масс кузова и сиденья в область более высоких частот и снижает пиковые её значения на низшей резонансной частоте.

3. При установке релаксационного элемента в подвеске кузова возрастает значение АЧХ перемещения непрессоренной массы, что ухудшает связь колёс с дорогой и снижает устойчивость против заноса.

4. Релаксационный элемент подвески кузова автомобиля, несомненно, усложняет её конструкцию. Применение его на транспортных автомобилях, предназначенных для использования на дорогах с твердым покрытием, нецелесообразно.

5. Применение релаксационного элемента может оказаться целесообразным в подвесках специальных автомобилей, предназначенных для эксплуатации во внедорожных условиях, а также на тракторах и строительно-дорожных машинах.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Crosby, M. J. The Active Damper – a New Concept for Shock and Vibration Control / M. J. Crosby, D. C. Karnopp // 43rd Shock and Vibration Bulletin, Part H, June, 1973. – P. 46–73.
2. Karnopp, D. C. Vibration control using semi-active force generators / D. C. Karnopp, M. J. Crosby, R. A. Harwood // Transactions of the ASME. Journal of Engineering for Industry. – 1974. – Vol. 96. – P. 619–626.
3. Фурунжиев, Р. И. Исследование некоторых вопросов демпфирования колебаний автомобиля : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Р. И. Фурунжиев. – Минск, 1965. – 17 с.
4. Extended ground-hook – new concept of semi-active control of truck's suspension / M. Valasek [et al.] // Vehicle system dynamics. – 1997. – Vol. 27, No. 5–6. – P. 289–303.
5. Анализ принципов регулирования демпфирования «скайхук» и «граундхук» в подвеске автомобиля / К. В. Чернышёв, И. М. Рябов, А. В. Поздеев, Т. В. Пылинская // Грузовик. – 2018. – № 10. – С. 3–6.
6. Дмитриев, А. А. Теория и расчёт нелинейных систем подрессоривания гусеничных машин / А. А. Дмитриев, В. А. Чобиток, А. В. Тельминов. – Москва : Машиностроение, 1976. – 207 с.
7. Биргер, И. А. Сопротивление материалов : учебное пособие / И. А. Биргер, Р. Р. Мавлютов. – Москва : Наука, 1986. – 560 с.
8. Амельченко, Н. П. Подвеска сиденья водителя колёсного трактора / Н. П. Амельченко, В. А. Ким. – Могилёв : Белорус.-Рос. ун-т, 2006. – 180 с.
9. Способ повышения эффективности линейной виброзащитной системы водителя трактора / И. С. Сазонов, В. А. Ким, Н. П. Амельченко, О. В. Билык, Э. И. Ясюкович, Д. А. Линник. // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2011. – № 2 (31). – С. 96–99.
10. Тарасик, В. П. Математическое моделирование технических систем / В. П. Тарасик. – Минск : Новое знание, 2016. – 592 с.
11. Тарасик, В. П. Теория движения автомобиля : учебник для вузов / В. П. Тарасик. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2006. – 478 с.
12. Яценко, Н. Н. Форсированные полигонные испытания грузовых автомобилей / Н. Н. Яценко. – Москва : Машиностроение, 1984. – 328 с.

13. **Ротенберг, Р. В.** Подвеска автомобиля. Колебания и плавность хода / Р. В. Ротенберг. – Москва : Машиностроение, 1972. – 392 с.

*Статья сдана в редакцию 20 декабря 2018 года*

**Владимир Петрович Тарасик**, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет.  
E-mail: avtobru@gmail.com.

**Vladimir Petrovich Tarasik**, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University.  
E-mail: avtobru@gmail.com.

---

УДК 621.9.047:669:538.8

*В. М. Шеменков, А. Л. Шеменкова*

**СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕ ОКСИДНОЙ  
МИНЕРАЛОКЕРАМИКИ ТЛЕЮЩИМ РАЗРЯДОМ**

---

UDC 621.9.047:669:538.8

*V. M. Shemenkov, A. L. Shemenkova*

**STRUCTURAL PHASE MODIFICATION OF OXIDE CUTTING CERAMICS  
BY GLOW DISCHARGE**

---

**Аннотация**

Представлены результаты исследования структуры и фазового состава минералокерамики ЦМ-332 в исходном состоянии и после обработки тлеющим разрядом при различных его энергетических характеристиках. Установлено, что обработка тлеющим разрядом приводит к измельчению фрагментов  $Al_2O_3$ , инициированию радиационно-ускоренной диффузии, которая способствует размытию межфазных границ с формированием двойного оксида  $NiAl_2O_4$  и равномерному распределению элементов в поверхностном слое глубиной до 140 мкм, изменению параметров кристаллической решетки, а также напряженного состояния. Указанные изменения позволяют повысить твердость обработанных многогранных пластин на 360...370 HV и износостойкость в 1,30...1,35 раза по отношению к необработанным.

**Ключевые слова:**

тлеющий разряд, минералокерамика, структура, фаза, модифицирование, рентгеноструктурный анализ, твердость, износостойкость.

**Abstract**

This paper presents the results of the research into the structure and phase composition of cutting ceramics CM-332 in its initial state and after it was treated by glow discharge with different energy characteristics. It has been found that the glow discharge treatment leads to the grinding of  $Al_2O_3$  fragments; the initiation of radiation-accelerated diffusion, which contributes to the blurring of interphase boundaries with the formation of double oxide  $NiAl_2O_4$ ; the uniform distribution of elements in the surface layer up to 140 microns deep, as well as to the changes in the crystal lattice parameters and the changes in the stress state. These changes make it possible to have a 360...370 HV increase in the hardness of multi-faceted treated plates and a 1.30...1.35-fold increase in their wear resistance, compared to the plates that were not subjected to the glow charge treatment.

**Keywords:**

glow discharge, cutting ceramics, structure, phase, modification, x-ray structural analysis, hardness, wear resistance.

---

**Введение**

Основными параметрами конкурентоспособности продукции машиностроения являются ее надежность и работоспособность. Указанные эксплуатационные характеристики изделий во многом зависят от качества поверхностного слоя, получаемого в больших слу-

чаях на финишных операциях механической обработки, среди которых ведущими являются операции чистовой лезвийной обработки, характеризующиеся высокими скоростями и малыми глубинами резания, что, в свою очередь, приводит к локализации значительных температур и нагрузок на вершине режущего инструмента. Влияние этих факторов

существенно возрастает при повышении твердости обрабатываемых материалов, имеющих высокий предел прочности. Поэтому инструмент для обработки таких материалов должен обладать повышенной твердостью, высокой теплоустойчивостью и хорошим сопротивлением к износу [1, 2].

Минералокерамика как инструментальный материал, обладающий комплексом высоких эксплуатационных свойств, эффективно используется в металлообработке с середины прошлого века. Однако, учитывая последние тенденции в металлообработке, связанные со значительным повышением скоростей резания, особенно на финишных операциях, остро стоит вопрос о повышении износостойкости инструментальных материалов и минералокерамики в частности.

Химические свойства оксидной керамики и специфика ее получения делают практически невозможным применение классических методов повышения износостойкости, что выделяет в качестве перспективного способ модифицирующей обработки поверхностного слоя тлеющим разрядом [3–9].

Целью являлось установление влияния технологических факторов обработки тлеющим разрядом минералокерамики ЦМ-332 на структурно-фазовые превращения и физико-механические свойства поверхностного слоя.

В качестве объекта исследования были выбраны многогранные неперетачиваемые квадратной формы пластины SNUN-120416 из режущей керамики ЦМ-332.

### ***Методика исследования***

Применялись электронно-микроскопический, рентгеноструктурный, дюриметрический и другие методы анализа фазового состава, структуры и свойств поверхностных слоев минералокерамики.

Электронно-микроскопический анализ поверхностного слоя образцов

проводился при помощи сканирующего электронного микроскопа Tescan VEGA 2SBA с применением стандартного детектора вторичных электронов. Для выявления структуры керамики использовался метод ионного травления [10].

Рентгеноструктурный анализ осуществлялся на автоматизированном рентгеновском комплексе, на базе дифрактометра ДРОН-3М с применением монохроматизированного Со $\alpha$ -излучения. В качестве кристалла-монохроматора использовали пластину пиролитического графита. Рентгеновская съемка выполнялась при напряжении  $U = 30$  кВ, токе  $J = 15$  мА в режиме сканирования (по точкам) с шагом  $0,1^\circ$ , продолжительность набора импульсов в каждой точке составляла 20 с, при этом съемка велась в интервале углов рассеяния  $2\theta = 20 \dots 85^\circ$ .

Физическое уширение дифракционных линий определялось методом аппроксимации с помощью программного обеспечения HighScore++ (Panalytical, Нидерланды). В качестве эталона использовался образец отожженной стали 10 ГОСТ 1050–88 [10, 11].

Измерение твердости рабочей поверхности многогранных пластин производилось на твердомере Zwick Roell ZHV 1M путем вдавливания алмазного наконечника в форме правильной четырехгранной пирамиды с углом при вершине между противоположными гранями  $136^\circ$  в образец под действием нагрузки 4,903 Н, приложенной в течение 10 с/ и измерения диагоналей отпечатка, оставшегося на поверхности после снятия нагрузки.

Учитывая прикладной аспект выполняемой работы, испытания на износостойкость проводились в условиях непосредственного снятия слоя металла с заготовки на фрезерном станке при фрезеровании брусков ( $80 \times 80 \times 400$  мм). Операция фрезерования для оценки износостойкости выбрана на основании того, что при данной обработке на переднюю поверхность инструмен-

та воздействуют знакопеременные силовые нагрузки и температуры. Результаты исследования, проведенного при указанных условиях, позволят распространить их на любые виды лезвийной обработки.

В качестве обрабатываемого материала была выбрана конструкционная сталь 45 ГОСТ 1080–88 (твёрдость 48...52 HRC).

### Результаты исследования и их обсуждение

На основании металлографического анализа минералокерамики ЦМ-332 (рис. 1) следует, что представленные для исследования образцы соответствуют классическому химическому составу, характерному оксидной керамике.

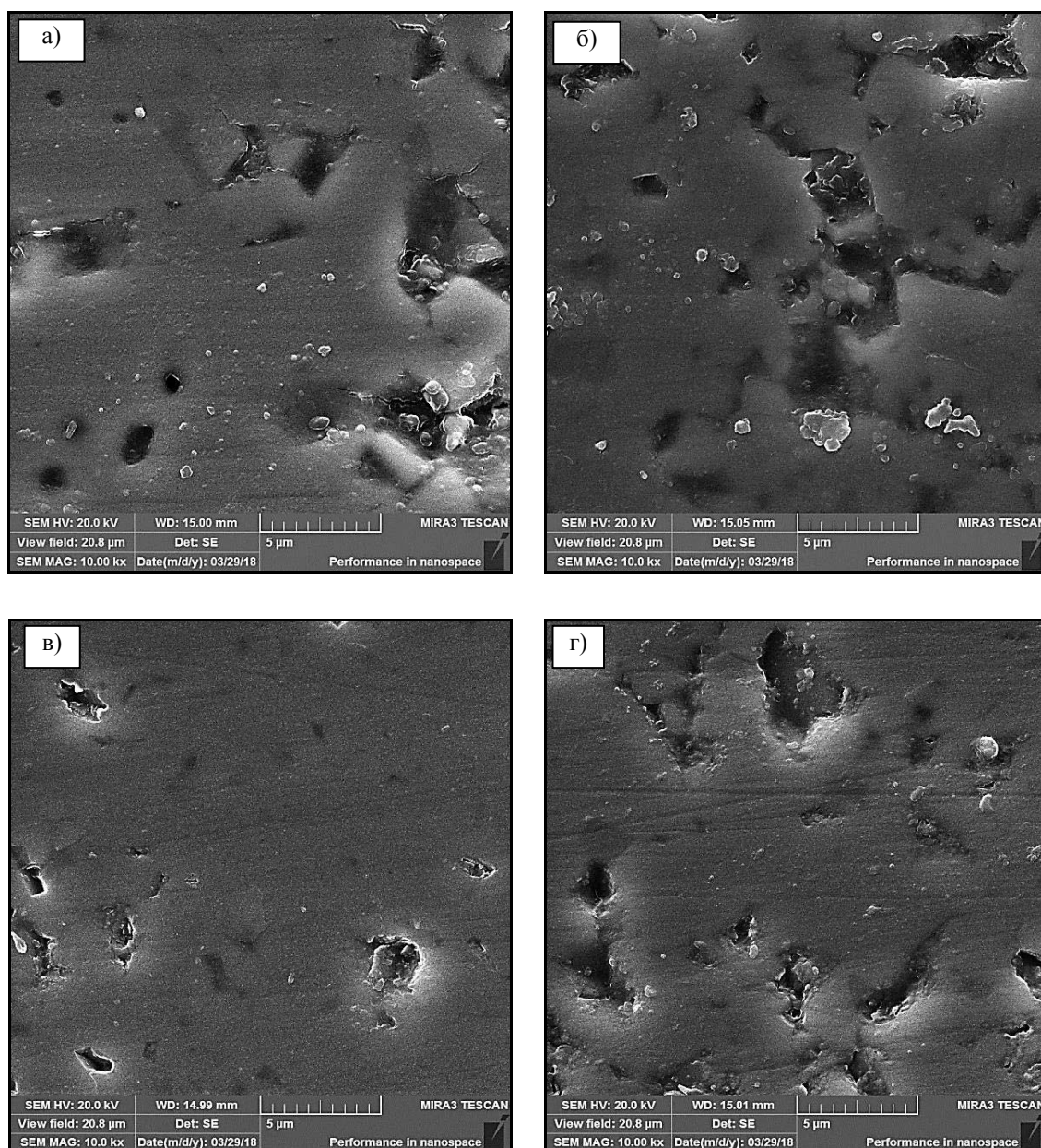


Рис. 1. Структура режущей керамики ЦМ-332: а – в состоянии поставки; б – после обработки в тлеющем разряде с удельной мощностью горения 0,15 кВт/м<sup>2</sup>; в – после обработки в тлеющем разряде с удельной мощностью горения 0,50 кВт/м<sup>2</sup>; г – после обработки в тлеющем разряде с удельной мощностью горения 0,90 кВт/м<sup>2</sup>



На снимках четко видно, что основной минералокерамики является оксид алюминия  $Al_2O_3$  с незначительными включениями металлической связки, роль которой, по всей видимости, выполняет Ni. В процессе спекания, как видно на исходном снимке (см. рис. 1), в структуре керамики образовались фрагменты соединения  $NiAl_2O_4$ . Они имеют сложную форму с четкими границами со средней площадью  $0,05 \text{ мкм}^2$ .

Воздействие тлеющим разрядом приводит к измельчению фрагментов и

размытию их границ, что может быть объяснено протеканием в процессе обработке радиационно-иницируемой граничной и объемной диффузии. Эффект наиболее ярко наблюдается при обработке с удельной мощностью горения разряда  $0,9 \text{ кВт/м}^2$  (см. рис. 1, г). Механизм приводит к равномерному распределению элементов.

Величина модифицированного слоя определялась на основе разницы фазовых контрастов модифицированных и необработанных участков (рис. 2).

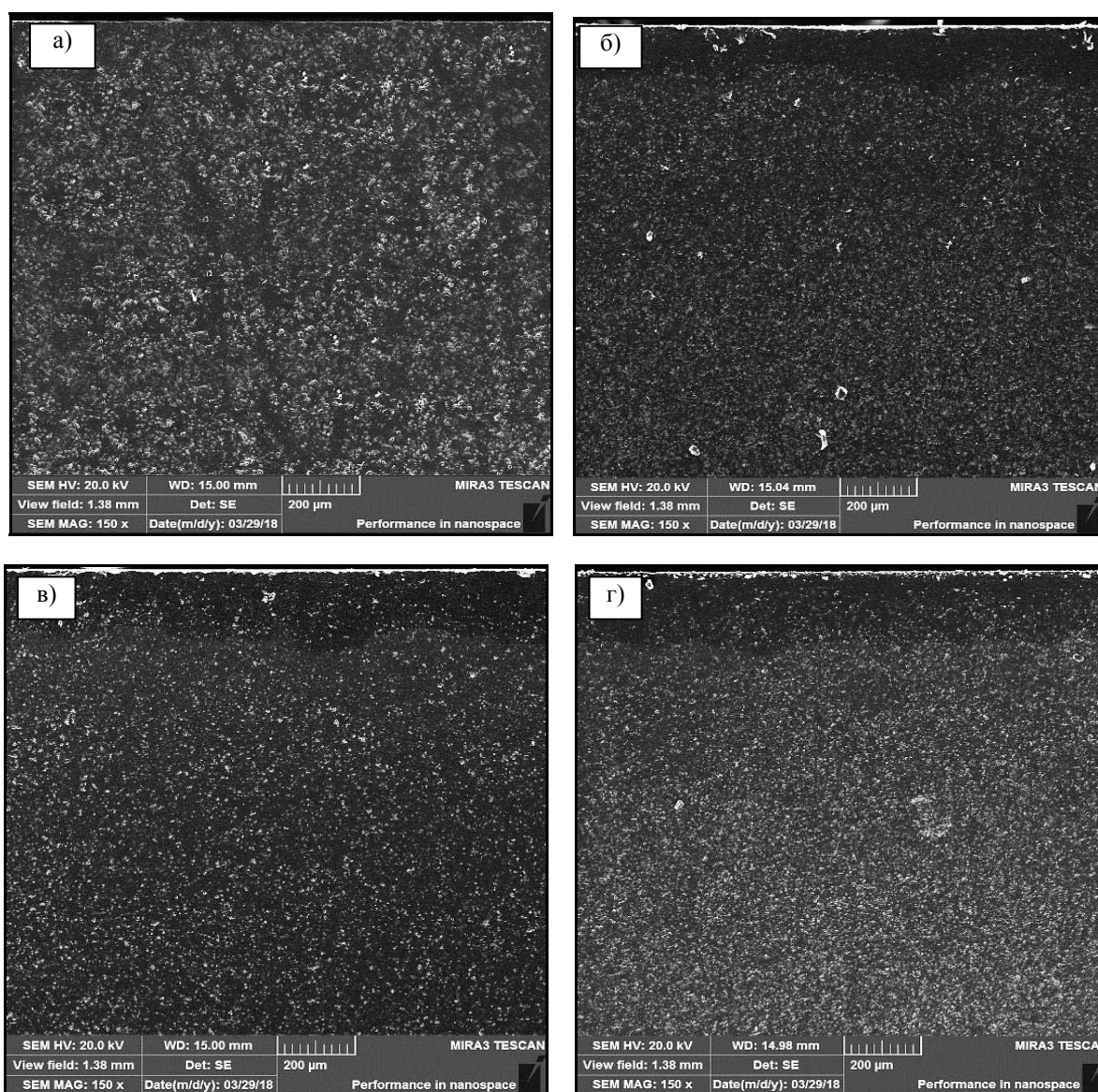


Рис. 2. Структура режущей керамики ЦМ-332 по поверхности разреза пластины: а – в состоянии поставки; б – после обработки в тлеющем разряде с удельной мощностью горения  $0,15 \text{ кВт/м}^2$ ; в – после обработки в тлеющем разряде с удельной мощностью горения  $0,50 \text{ кВт/м}^2$ ; г – после обработки в тлеющем разряде с удельной мощностью горения  $0,90 \text{ кВт/м}^2$

Обработка результатов эксперимента позволила математически отразить зависимость глубины модифицированного слоя  $h_{\Delta}$ , мкм, от удельной мощности горения разряда  $W$ , кВт/м<sup>2</sup>, в виде степенной функции

$$h_{\Delta} = 145 \cdot W^{0,2}, \quad (1)$$

где  $W$  – удельная мощность горения разряда, кВт/м<sup>2</sup>.

Как видно из рис. 2, глубина модифицированного слоя, полученная при обработке тлеющим разрядом, для одной и той же удельной мощности горения имеет разброс от среднего значения до 12 %, что свидетельствует о нелинейности протекающих процессов при обработке.

Рентгеноструктурный анализ показал, что в состав исходного образца и образцов минералокерамики ЦМ-332, подвергнутых обработке, входят корунды  $Al_2O_3$  (ромбоэдрическая кристаллическая решетка, пространственная группа R-3c,  $a = 0,47592$  нм,  $c = 1,2992$  нм, карточка PDF № 43-1484) и двойной оксид от связки  $NiAl_2O_4$  (кубическая гранцентрированная кристаллическая решетка, пространственная группа Fm-3m,  $a = 0,80530$  нм, карточка PDF № 71-965).

Особенностью структуры минералокерамики в состоянии поставки (рис. 3) является наличие текстуры, о чем непосредственно свидетельствует несоответствие распределения интенсивности ди-

фракционных линий эталонному образцу. В частности, в случае эталона максимальная интенсивность характерна для отражения (113), что не соответствует дифрактограмме в исходном состоянии. Обработка тлеющим разрядом с удельной мощностью горения 0,15 кВт/м<sup>2</sup> приводит к усилению текстуры. Напротив, после обработки тлеющим разрядом с удельной мощностью горения 0,5 кВт/м<sup>2</sup> текстура не регистрируется и распределение интенсивности между дифракционными линиями практически соответствует эталону. Обработка разрядом с удельной мощностью горения 0,9 кВт/м<sup>2</sup> уменьшает текстуру исходного образца.

Параметр решетки «а» оксида алюминия почти не зависит от вида обработки композита (табл. 1). В свою очередь, параметр решетки «с» в исходном состоянии значительно больше эталонного значения, что может свидетельствовать о наличии сжимающих напряжений. Физические уширения дифракционных линий 113 и 104 находятся в диапазоне между отношением  $\sec\theta_{113}/\sec\theta_{104}$ , равным 0,96, и отношением  $\tan\theta_{113}/\tan\theta_{104}$ , равным 1,27. Указанный факт свидетельствует о том, что уширение дифракционных линий обусловлено как дисперсностью кристаллического строения оксида алюминия, так и высоким содержанием в нем линейных дефектов [4, 5].

Табл. 1. Физическое уширение и параметры решетки корунда

Образец	Физическое уширение $\times 10^{-3}$ рад		$\beta_{113}/\beta_{104}$	Параметры решетки, нм	
	$\beta_{104}$	$\beta_{113}$		a ( $Al_2O_3$ )	c ( $Al_2O_3$ )
Исходный	1,32	1,32	1,00	0,47511	1,30005
$W = 0,15$ кВт/м <sup>2</sup>	1,90	2,10	1,11	0,47511	1,29792
$W = 0,50$ кВт/м <sup>2</sup>	1,53	1,59	1,04	0,47411	1,29762
$W = 0,90$ кВт/м <sup>2</sup>	1,90	1,83	0,96	0,47518	1,29914

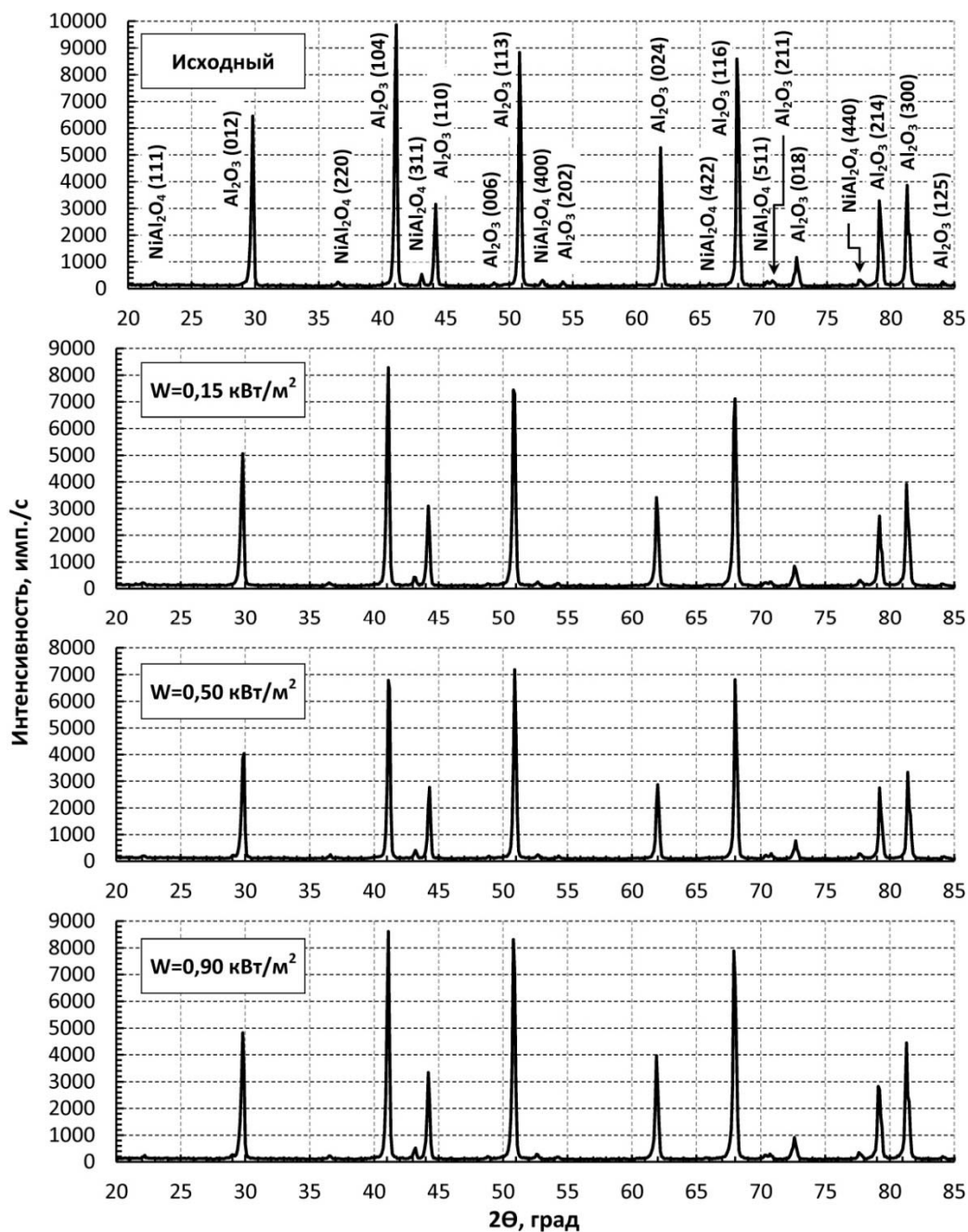


Рис. 3. Фрагменты дифрактограмм исходного образца режущей керамики ЦМ-332 и образцов, подвергнутых обработке с различными удельными мощностями горения тлеющего разряда

В результате обработки тлеющим разрядом регистрируется рост величины физического уширения дифракционных линий. Отношение  $\beta_{113}/\beta_{104}$  находится между величинами отношений секансов и тангенсов соответствующих углов дифракции и свидетельствует о том, что уширение дифракционных линий, так же как и для необработанного образца ми-

нералокерамики, обусловлено как дисперсностью кристаллического строения поверхностного слоя керамики, так и высоким содержанием в нем линейных дефектов. Тем не менее на основании зарегистрированного роста отношения  $\beta_{113}/\beta_{104}$  можно сделать вывод, что после обработки тлеющим разрядом с указанными параметрами вклад в уши-

рение дифракционных линий от наличия дефектов кристаллического строения будет выше, чем в исходном состоянии. Величина параметра решетки «с» значительно уменьшается, что свидетельствует о снятии остаточных сжимающих макронапряжений и переходе их в растягивающие.

Особое внимание заслуживает обработка минералокерамики тлеющим разрядом с удельной мощностью горения  $0,9 \text{ кВт/м}^2$ . Помимо роста величины физического уширения дифракционных линий, как и в предыдущих случаях, регистрируется уменьшение параметра

$$\begin{aligned} H'_{\text{HV}_{500}\text{ЦМ332}} = & 62,4 + 14,9 \left( \frac{U-2,0}{0,7} \right) + 8,4 \left( \frac{J-0,25}{0,075} \right) + 13,6 \left( \frac{T-30}{10} \right) + \\ & + 12,3 \left( \frac{U-2,0}{0,7} \right) \left( \frac{J-0,2}{0,075} \right) - 16,3 \left( \frac{U-2,0}{0,7} \right) \left( \frac{T-30}{10} \right) - \\ & - 17,3 \left( \frac{J-0,25}{0,075} \right) \left( \frac{T-30}{10} \right) + 48,1 \left( \frac{U-2,0}{0,7} \right)^2 + 24,8 \left( \frac{J-0,25}{0,075} \right)^2 + 40,7 \left( \frac{T-30}{10} \right)^2. \end{aligned} \quad (2)$$

Графическая интерпретация полученной модели, показывающая зависимость приращения твердости образцов из минералокерамики ЦМ-332 от двух технологических факторов обработки тлеющим разрядом при значении третьего, находящегося на основном уровне, отображена на рис. 4.

Анализируя результаты моделирования, можно назвать значения основных характеристик обработки, соответствующие наибольшим приращениям поверхностной твердости минералокерамики ЦМ-332. С учетом наименьшего значения удельной мощности горения разряда принимаем напряжение горения

решетки «с» до значения, близкого к эталонному, что свидетельствует о снятии напряжений.

На основании статистической обработки экспериментальных данных, исследования твердости рабочей поверхности пластин в состоянии поставки и после обработки тлеющим разрядом получена зависимость приращения поверхностной твердости по Виккерсу  $H'_{\text{HV}_{500}}$  образцов из минералокерамики ЦМ-332 в натуральном выражении, адекватно представляющая эксперимент:

$U = 3,2 \text{ кВ}$ , плотность тока  $J = 0,25 \text{ А/м}^2$  (удельная мощность горения разряда  $W = 0,8 \text{ кВт/м}^2$ ) при времени обработки  $T = 15 \text{ мин}$ .

На основании статистической обработки экспериментальных данных исследования изнашивания многогранных пластин в состоянии поставки и после обработки тлеющим разрядом получена зависимость приращения коэффициента износостойкости образцов из минералокерамики ЦМ-332 при фрезеровании закаленной стали 45 в натуральном выражении, адекватно представляющая эксперимент:

$$\begin{aligned} k_{L45\text{ЦМ332}} = & 1,019 + 0,038 \left( \frac{U-2,0}{0,7} \right) + 0,047 \left( \frac{J-0,25}{0,075} \right) - 0,009 \left( \frac{T-30}{10} \right) + \\ & + 0,001 \left( \frac{U-2,0}{0,7} \right) \left( \frac{J-0,25}{0,075} \right) + 0,011 \left( \frac{U-2,0}{0,7} \right) \left( \frac{T-30}{10} \right) - 0,006 \left( \frac{J-0,25}{0,075} \right) \left( \frac{T-30}{10} \right) + \\ & + 0,036 \left( \frac{U-2,0}{0,7} \right)^2 + 0,029 \left( \frac{J-0,25}{0,075} \right)^2 + 0,003 \left( \frac{T-30}{10} \right)^2. \end{aligned} \quad (3)$$

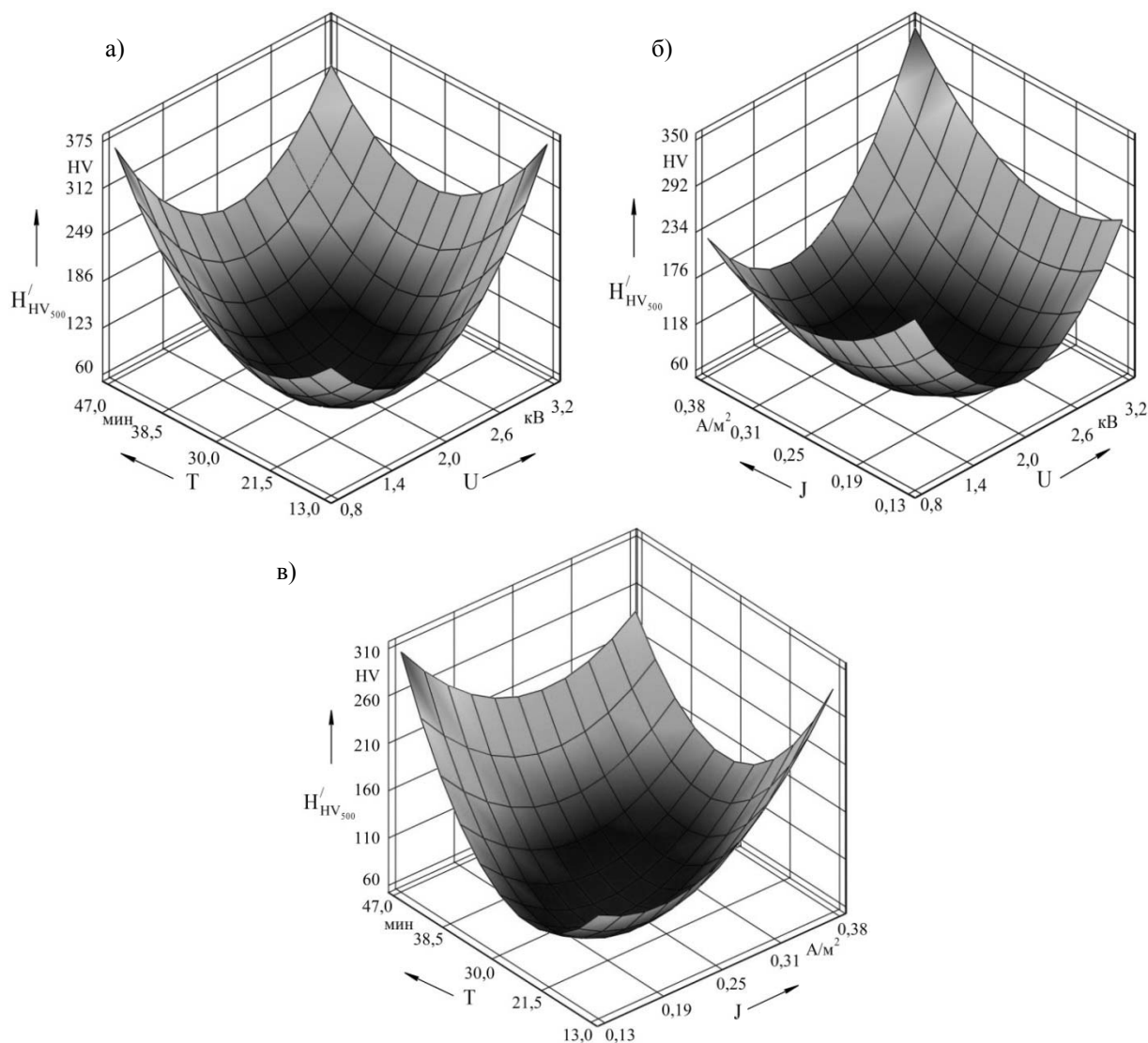


Рис. 4. Влияние напряжения  $U$  тлеющего разряда и времени обработки  $T$  (а), напряжения  $U$  и плотности тока  $J$  (б), плотности тока  $J$  тлеющего разряда и времени обработки  $T$  (в) на приращение микротвердости по Виккерсу поверхности образцов из минералокерамики ЦМ-332

Графическая интерпретация полученной модели отображена на рис. 5.

Анализируя результаты моделирования, можно выделить значения основных характеристик обработки, соответствующие наибольшему приращению коэффициента износостойкости минералокерамики ЦМ-332. С учетом наименьшего значения удельной мощности горения тлеющего разряда принимаем напряжение горения  $U = 3,2$  кВ, плотность тока  $J = 0,375$  А/м<sup>2</sup> (удельная мощность горения разряда  $W = 1,2$  кВт/м<sup>2</sup>) при времени обработки  $T = 30$  мин.

### Заключение

1. Обработка режущей минералокерамики ЦМ-332 тлеющим разрядом с различными энергетическими характеристиками приводит к измельчению фрагментов  $Al_2O_3$ , инициированию радиационно-ускоренной диффузии, которая способствует размытию межфазных границ с формированием двойного оксида  $NiAl_2O_4$  и равномерному распределению элементов в поверхностном слое глубиной до 140 мкм, изменению параметров кристаллической решетки, а так-

же напряженного состояния.

2. В результате обработки многогранных пластин тлеющим разрядом в течение 15 мин с напряжением горения  $U = 3,2$  кВ, плотностью тока  $J = 0,25$  А/м<sup>2</sup> наблюдается максимальное повышение твердости (360...370 HV) рабочей по-

верхности, а при увеличении времени обработки до 30 мин и плотности тока до 0,375 А/м<sup>2</sup> появляется возможность добиться максимального повышения износостойкости пластин в 1,30...1,35 раза по отношению к необработанным.

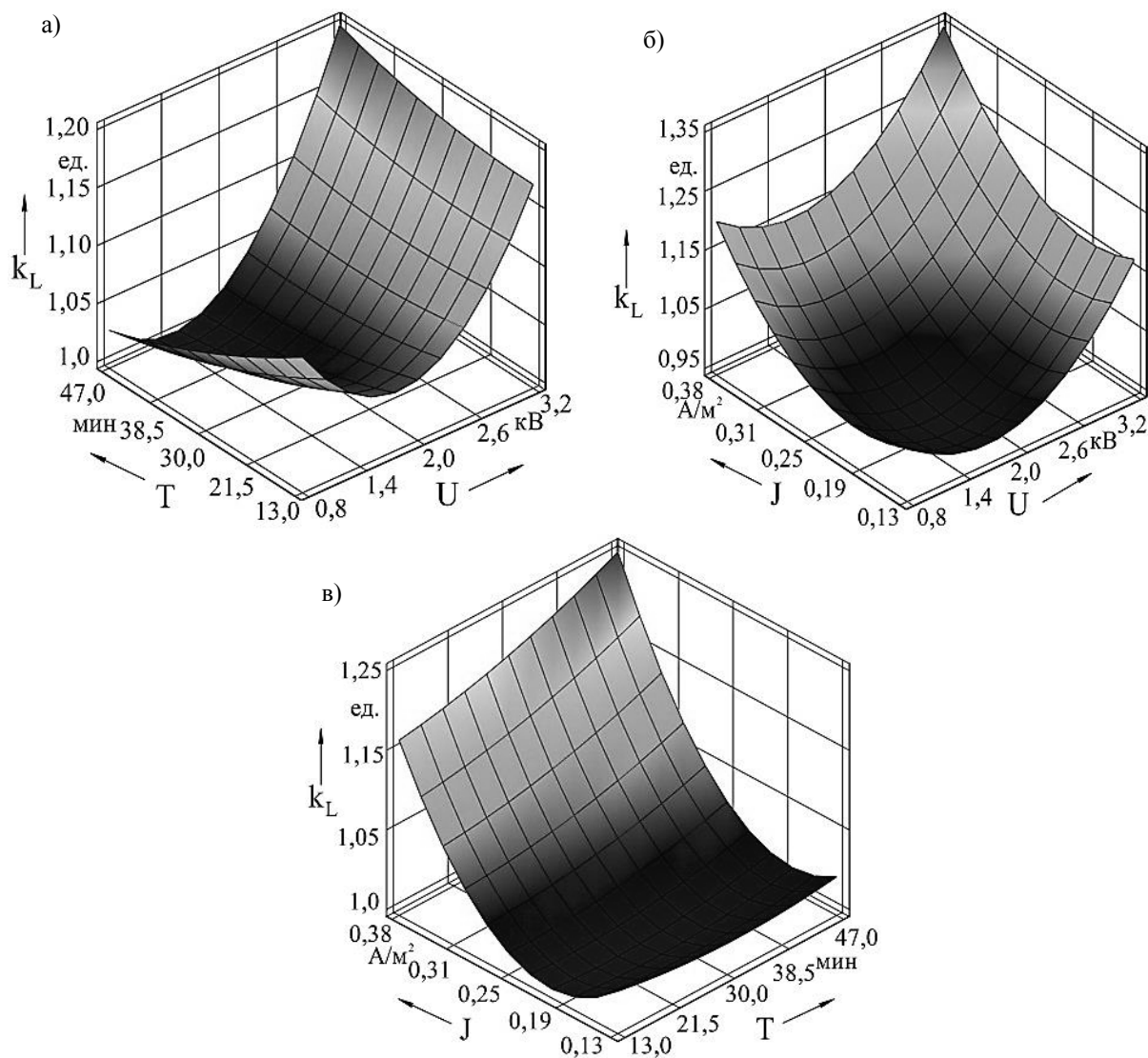


Рис. 5. Влияние напряжения  $U$  тлеющего разряда и времени обработки  $T$  (а), напряжения  $U$  и плотности тока  $J$  (б), плотности тока  $J$  тлеющего разряда и времени обработки  $T$  (в) на приращение коэффициента износостойкости образцов из минералокерамики ЦМ-332

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Структурно-фазовое модифицирование инструментальных материалов тлеющим разрядом : [монография] / В. М. Шеменков [и др.] ; под общ. ред. В. М. Шеменкова. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – 270 с. : ил.

2. **Шеменкова, А. Л.** Влияние тлеющего разряда на структуру и фазовый состав режущей оксидно-карбидной керамики / А. Л. Шеменкова, Ф. Г. Ловшенко, В. М. Шеменков // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2015. – № 3 (48). – С. 79–87.
3. Способ упрочнения изделий из металла или сплава, или сверхтвердого или графитсодержащего материала : пат. № 14716 ВУ, U C 21 D 1/78 / В. М. Шеменков, А. Ф. Короткевич. – Опубл. 10.05.2011.
4. Влияние обработки тлеющим разрядом на структуру, фазовый состав, твердость и износостойкость быстрорежущей стали Р9 / В. М. Шеменков, М. А. Белая, О. В. Обидина, А. Э. Липский // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2017. – № 4. – С. 535–541.
5. **Обидина, О. В.** Влияние плазменной обработки на структуру и свойства быстрорежущих сталей Р6М5 и S90 / О. В. Обидина, В. М. Шеменков, А. Э. Липский // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2016. – № 4. – С. 522–529.
6. Влияние обработки тлеющим разрядом на структуру, фазовый состав и износостойкость сталей, подвергнутых химико-термической обработке / В. М. Шеменков, Ф. Г. Ловшенко, М. А. Белая, А. Л. Шеменкова // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2016. – № 1. – С. 100–113.
7. Влияние плазменной обработки на структуру и свойства твердого сплава ВК10 / О. В. Обидина, В. М. Шеменков, Ф. М. Трухачев, А. В. Маркидонов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2015. – № 4. – С. 482–487.
8. Повышение эксплуатационных характеристик режущего инструмента обработкой в плазме тлеющего разряда / В. М. Шеменков, О. В. Обидина, А. Л. Шеменкова, М. А. Белая // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2014. – № 4. – С. 540–544.
9. **Шеменков, В. М.** Влияние обработки тлеющим разрядом на структуру, фазовый состав и твердость износостойких защитных покрытий на основе титана / В. М. Шеменков, М. А. Белая, А. Л. Шеменкова // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2017. – № 1. – С. 118–127.
10. **Горелик, С. С.** Рентгенографический и электронно-оптический анализ : учебное пособие для вузов / С. С. Горелик, Ю. А. Скаков, Л. Н. Расторгуев. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : МИСИС, 2002. – 360 с. : ил.
11. **Лысак, Л. И.** Определение истинной ширины рентгеновских интерференционных линий с применением стандартного образца / Л. И. Лысак // Вопросы физики металлов и металловедения : сб. тр. – Киев, 1955. – № 6. – С. 40–53.

*Статья сдана в редакцию 20 декабря 2018 года*

**Владимир Михайлович Шеменков**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.  
E-mail: VShemenkov@yandex.ru.

**Алла Леонидовна Шеменкова**, инженер-технолог, ОАО «Могилевлифтмаш».  
E-mail: VShemenkov@yandex.ru.

**Vladimir Mikhailovich Shemenkov**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.  
E-mail: VShemenkov@yandex.ru.

**Alla Leonidovna Shemenkova**, manufacturing engineer, JSC «Mogilevliftmash».  
E-mail: VShemenkov@yandex.ru.

ФИЗИКА

УДК 535.31 + 621.658.011

*А. В. Хомченко, И. У. Примак, А. Н. Василенко*

**АНАЛИЗ ПОЛЕЙ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЗАКАЛЕННОМ СТЕКЛЕ МЕТОДОМ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ**

UDC 535.31 + 621.658.011

*A. V. Khomchenko, I. U. Primak, A. N. Vasilenko*

**ANALYSIS OF MECHANICAL STRESS FIELDS IN TEMPERED GLASS BY MEANS OF POLARIZATION INTERFEROMETRY**

**Аннотация**

Исследованы возможности и границы применения поляризационно-оптического метода анализа распределения величины двулучепреломления в закаленных стеклах большой площади. Выполнена калибровка измерительной установки с использованием стандартного метода оценки качества закаленного стекла. Продемонстрирована возможность контроля распределения величины механических напряжений вдоль поверхности закаленного стекла по результатам обработки его изображений в поляризованном свете.

**Ключевые слова:**

закаленное стекло, поляриметрия, контроль распределения двулучепреломления в плоскости стекла.

**Abstract**

The possibilities and limitations of using the polarization techniques for testing the birefringence distribution in large-area tempered glass are presented. The measuring device has been calibrated by using the standard technique for tempered glass parameter determination. The possibility of testing the distribution of mechanical stresses in tempered glass is demonstrated based on the results of the processing of their images recorded at polarized light.

**Keywords:**

tempered glass, polarimetry, control/testing of birefringence distribution in tempered glass.

**Введение**

В промышленности и строительной отрасли широко применяются изделия из стекла. Для улучшения механических свойств стеклянных изделий их поверхность обычно подвергается упрочнению. В ряде случаев упрочнение выполняется методом термической закалки. Закаленное стекло используется при изготовлении задних и боковых стекол наземного

транспорта. Механические и оптические характеристики такого стекла определяются характером и режимами его закалки. В процессе закалки стекло нагревается до температуры ~ 600 °С, а затем охлаждается воздушным потоком таким образом, что его поверхности охлаждаются более интенсивно в сравнении с внутренней частью, что и приводит к появлению механических напряжений [1, 2]. Напряжения обеспечивают прочность закаленного



стекла и обуславливают его безопасную эксплуатацию. Процессы закалки стекла известны давно и достаточно хорошо исследованы [3–8], а проблему контроля параметров закаленных стекол можно решить, учитывая тот факт, что стекло при наличии в нем механических напряжений становится анизотропным, и поляризационно-оптические методы исследования позволяют оценить величину и распределение этих напряжений [9–11]. Измерения интенсивности поляризованного света, прошедшего через исследуемый образец, в каждой его точке дают возможность оценить анизотропию стекла, и т. к. коэффициент пропускания стекла связан с главными значениями напряжений, – определить их величину. При этом следует отметить, что, измеряя распределение интенсивности света, можно анализировать и оценивать механические напряжения в отдельной точке стекла, но достаточно сложно это выполнить для протяженных анизотропных объектов. В то же время для разработки эффективной технологии закалки и современного технологического оборудования необходим анализ возникающего распределения механических напряжений вдоль всей поверхности образца.

Величина сжимающих напряжений, возникающих в модифицированном приповерхностном слое упрочняемых изделий, определяет их качество и зависит от параметров технологического процесса. Поэтому измерение механических напряжений является удобным способом контроля как качества изделий, так и технологических процессов их изготовления. Известно несколько физических методов определения напряжений, однако широкое распространение на производстве и в лабораторной практике получил поляризационно-оптический метод, но и он недостаточно точен и надежен. Значительная погрешность поляризационно-оптического метода обусловлена, во-первых, тем, что небольшие изменения растягивающих напряжений в центре закаленной стеклянной пластины

вызывают существенные изменения сжимающих напряжений, концентрирующихся в сравнительно тонком поверхностном слое [2, 4]. Во-вторых, отношение растягивающих и сжимающих напряжений непостоянно, а зависит от степени закалки и режимов упрочнения. Поэтому для получения надежных результатов сжимающие напряжения должны измеряться непосредственно на поверхности стекла. Очевидно также, что поляризационно-оптический метод годится для локального определения прочности стекла и не может быть применен к готовым, в особенности искривленным, изделиям.

Таким образом, разработка методов и средств контроля и обработки зарегистрированного распределения интенсивности света, прошедшего через закаленное стекло, является актуальной задачей.

### *Методика эксперимента*

Для контроля параметров закаленных стекол обычно применяются поляризационно-оптические методы исследования, основанные на измерении обусловленной механическими напряжениями анизотропии оптических характеристик материала и позволяющие получить представление о распределении механических напряжений в стекле. Оптическая схема используемой измерительной установки приведена на рис. 1.

В устройстве световой пучок от протяженного источника света 1, прошедший через поляризатор 2, попадает на исследуемый протяженный образец 3. Далее пучок света проходит через анализатор 4, светофильтр 5, фокусируется системой линз 6 на фотоэлектрическую матрицу 7, подключенную к компьютеру 8. Таким образом, используемая установка позволяет зарегистрировать распределение  $I(x, y)$  при определенной взаимной ориентации протяженного образца, поляризатора и анализатора. Синхронный поворот поляризатора и анализатора относительно исследуемого об-

разца на  $45^\circ$  осуществляется с помощью системы поворота 9. В устройстве линейно-поляризованный свет, проходя через исследуемое стекло 3, в котором

присутствуют механические напряжения, изменяет состояние поляризации (в стекле возникают обыкновенная и необыкновенная волны).

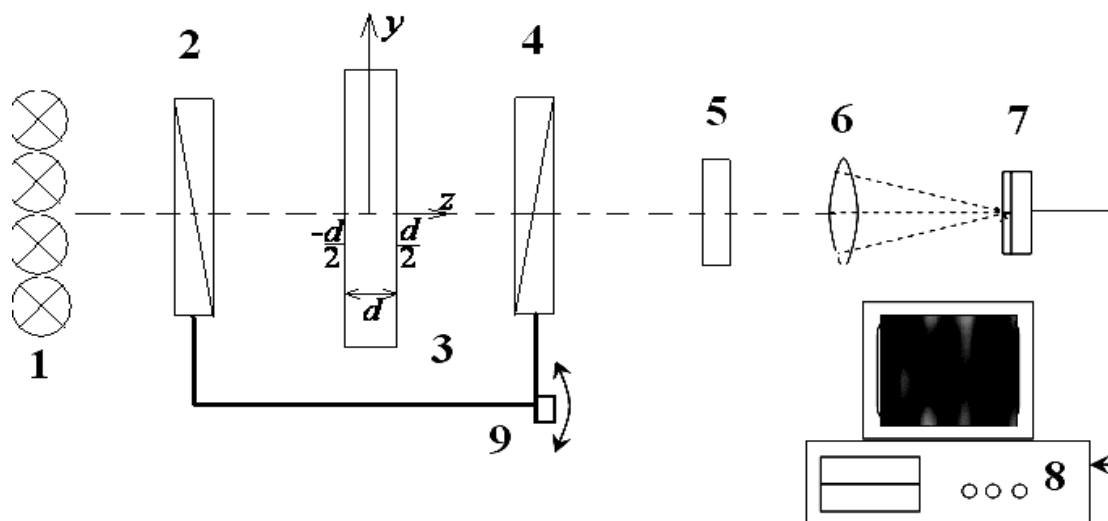


Рис. 1. Схема измерительной установки: 1 – источник света; 2 – поляризатор; 3 – контролируемое автомобильное стекло; 4 – анализатор; 5 – светофильтр; 6 – объектив; 7 – фоторегистрирующее устройство; 8 – компьютер; 9 – система поворота

После этого излучение, проходя через анализатор 4, скрещенный с поляризатором 2 (под углом  $90^\circ$ ), попадает в фоторегистрирующее устройство 7. Использование современной цифровой техники в качестве фоторегистрирующего устройства позволяет получать изображение, иллюстрирующее распределение напряжений вдоль поверхности стекла. При этом регистрируемая интенсивность света (рис. 2) является функцией двух координат и определяется как [10]

$$I(x, y) = I_p T \sin^2(2\alpha) \sin^2(\delta/2), \quad (1)$$

где  $I_p$  – интенсивность света на выходе из поляризатора;  $T$  – коэффициент, учитывающий отражение света от поверхностей стекла  $z = -d/2$  и  $z = d/2$ ;  $\alpha$  – угол между оптической осью и углом поляризатора;  $\delta$  – разность фаз между обыкновенной и необыкновенной волнами (в общем случае  $\alpha(x, y)$  и  $\delta = \delta(x, y)$ ).

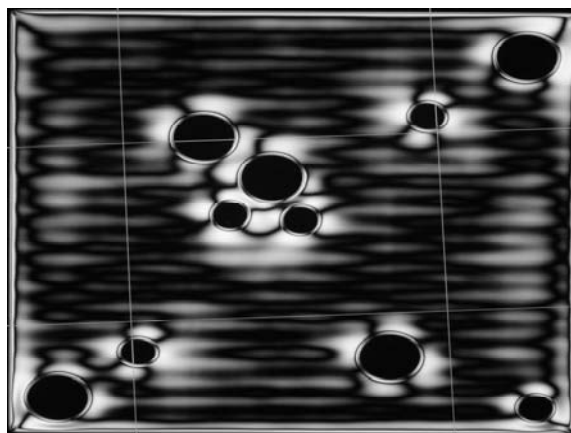


Рис. 2. Регистрируемое распределение интенсивности света, прошедшего через исследуемый неоднородный анизотропный объект

Обрабатывая регистрируемые распределения интенсивности  $I(x, y)$ , можно восстановить  $\delta(x, y)$  в каждой отдельно взятой точке стекла и, учитывая взаимосвязь фазы волны с механическими напряжениями, оценить их величину. Однако применение поляризационных методов ограничивается тем, что наблюдаемые распределения интенсивности включают в себя систему темных линий, так называемых изоклин, которые определяются распределением  $\alpha = \alpha(x, y)$  в стекле и искажают восстанавливаемую картину напряжений. Анализ результатов исследования распределения интенсивности света, прошедшего через исследуемый анизотропный образец, свидетельствует о том, что изоклины существенно искажают регистрируемую картину и не позволяют адекватно восстановить распределение напряжений. Данную проблему можно решить для рассматриваемой точки исследуемого стекла, устанавливая  $\alpha = 45^\circ$  (в этом случае

$I = I_0 |T|^2 \sin^2(\delta/2)$ ), но в протяженном стекле, где направление главных напряжений в каждой точке различно, это невозможно выполнить для всего поля напряжений. Известные способы позволяют избавиться от изоклин только в отдельных точках либо небольших областях восстанавливаемой картины [10] путем использования двух четвертьволновых пластинок, которые размещают с обеих сторон стекла. Изоклины исчезают, если оси четвертьволновых пластинок наклонены под углом  $45^\circ$  к плоскости поляризатора и анализатора. В то же время использование специальных компенсаторов существенно усложняет контроль напряжений в изделиях больших размеров.

#### **Визуализация распределения величины двулучепреломления в плоскости закаленных стекол**

В приведенной на рис. 1 принципиальной схеме устройства линейно-поляризованный свет, пройдя через ис-

следуемое стекло, в котором присутствуют механические напряжения, меняет состояние поляризации, проходит через анализатор и попадает в фоторегистрирующее устройство. При этом регистрируемая интенсивность света (см. рис. 2) является функцией двух координат и определяется как [10]

$$I(x, y) = I_p T (\cos^2 \chi - \sin(2\alpha) \times \sin(2(\alpha - \chi)) \sin^2(\delta/2)), \quad (2)$$

где  $I = I(x, y)$ ;  $I_p$  – интенсивность света на выходе из поляризатора,  $I_p = I_p(x, y)$ ;  $T$  – коэффициент, учитывающий отражение света от поверхностей стекла,  $T = T(x, y)$ ;  $\alpha$  – угол между оптической осью и плоскостью пропускания поляризатора,  $\alpha = \alpha(x, y)$ ;  $\chi$  – угол между поляризатором и анализатором;  $\delta$  – разность фаз между обыкновенной и необыкновенной волнами,  $\delta = \delta(x, y)$ .

Обрабатывая регистрируемые распределения интенсивности  $I(x, y)$ , можно восстановить разность фаз  $\delta$  в отдельной точке стекла или небольшой его области и, учитывая ее взаимосвязь с напряжением, определить величину напряжений. Однако это невозможно сделать для протяженных объектов, таких как, например, закаленные стекла и изделия из них.

Обычно наблюдаемое распределение интенсивности включает в себя систему темных линий, так называемых изоклин, положение которых определяется распределением  $\alpha = \alpha(x, y)$  в стекле (при  $\alpha = 0$  или  $\alpha = \pi/2$  интенсивность света в данной точке образца может быть равной нулю, даже если напряжения отличны от нуля).

В рамках отработки процедур визуализации и диагностики напряжений в протяженном объекте исследованы специально изготовленные закаленные стекла. При этом использован алгоритм фильтрации изоклин, искажающих картину восстанавливаемых напряжений, который основан на регистрации двух картин распределений интенсивности

света, прошедшего через исследуемое стекло и систему «поляризатор – анализатор», скрещенных под углом  $90^\circ$ . Дальнейшая обработка сводится к сложению в каждой точке поверхности стекла соответствующих интенсивностей света для указанных двух картин. В этом случае в результирующей картине распределения интенсивности света изоклины отсутствуют.

### Оценка параметров неравномерности остаточных напряжений

В поляризационной интерферометрии неоднородных анизотропных сред при измерении распределения величины двулучепреломления в плоскости протяженного объекта, заключающемся в регистрации интенсивности монохроматического света, прошедшего через поляризатор, исследуемый протяженный образец, анализатор, скрещенный с поляризатором под углом  $90^\circ$ , как функции двух координат, исследуемое распределение интенсивности прошедшего света  $I_1$  и  $I_2$  измеряют для двух ориентаций системы «поляризатор – анализатор» относительно исследуемого образца [12]:

– для произвольной ориентации

$$I_1(x, y) = I_p T \sin^2[2\alpha(x, y)] \times \sin^2 \frac{\delta(x, y)}{2}; \quad (3)$$

– после поворота системы «анализатор – поляризатор» относительно первоначального положения на угол  $45^\circ$

$$I_2(x, y) = I_p T \cos^2[2\alpha(x, y)] \times \sin^2 \frac{\delta(x, y)}{2}, \quad (4)$$

где  $I_p$  – интенсивность света на выходе из поляризатора;  $T$  – коэффициент, учитывающий отражение света от поверхностей стекла;  $\alpha$  – угол между оптиче-

ской осью и углом поляризатора;  $\delta$  – разность фаз между обыкновенной и необыкновенной волнами.

При этом переход из начального положения, которое выбирается произвольно, во второе осуществляется путем синхронного поворота системы «поляризатор – анализатор» на  $45^\circ$ , а поляризатор и анализатор в обоих положениях остаются ориентированными под углом  $90^\circ$  относительно друг друга.

После этого вычисляемое распределение  $I(x, y) = I_1(x, y) + I_2(x, y)$  уже не зависит от значения угла  $\alpha$  в данной точке образца:

$$I(x, y) = I_1 + I_2 = I_p T \sin^2 \frac{\delta(x, y)}{2}, \quad (5)$$

где  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_p$ ,  $T$  – экспериментально измеренные величины в каждой точке протяженного образца.

Таким образом, использование предложенного подхода позволяет из распределения (5) определить значение разности фаз  $\delta(x, y)$ , а следовательно, и величину двулучепреломления  $\Delta(x, y)$  при любой ориентации образца относительно системы «поляризатор – анализатор»:

$$\Delta(x, y) = \frac{\arcsin[(I / I_p T)^{1/2}]}{\pi d} \lambda = \frac{\arcsin[((I_1 + I_2) / I_p T)^{1/2}]}{\pi d} \lambda,$$

где  $\lambda$  – длина волны излучения;  $d$  – толщина исследуемого образца.

В данном выражении величина двулучепреломления в каждой точке образца определяется через экспериментально измеренные параметры  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_p$ ,  $T$ . Учитывая взаимосвязь фазы волны с напряжениями [9], можно определить распределение механических напряжений в плоскости исследуемого неоднородного образца.

### Калибровка измерительной установки на основе статистической обработки изображения разрушенного стекла

В стандартной схеме контроль качества закаленных стекол, согласно [14], осуществляется путем разрушения стекла и анализа размера и веса полученных осколков. Такой подход не позволяет контролировать всю выпускаемую продукцию, что приводит нередко к снижению ее качества. Для установления взаимосвязи между распределением величины механических напряжений и изображением осколков разрушенного закаленного стекла необходимо произвести сравнение и статистическую обработку полученных изображений. Следует отметить, что при разрушении закаленного

стекла внутренние напряжения разрывают образец на осколки и после этого идентифицировать положение осколков в плоскости исходного изделия не представляется возможным. Данная проблема была решена путем нанесения на поверхность стекла клеящейся прозрачной пленки, которая при разрушении стекла не позволяет разлетаться осколкам и сохраняет все части в исходном положении. Для проведения статистического анализа изображений разрушенного стекла необходима их некоторая дополнительная аппаратная обработка, которая дает возможность выделить отдельные осколки стекла и их границы. Схема установки и пример полученного с ее помощью изображения разрушенного стекла представлены на рис. 3.

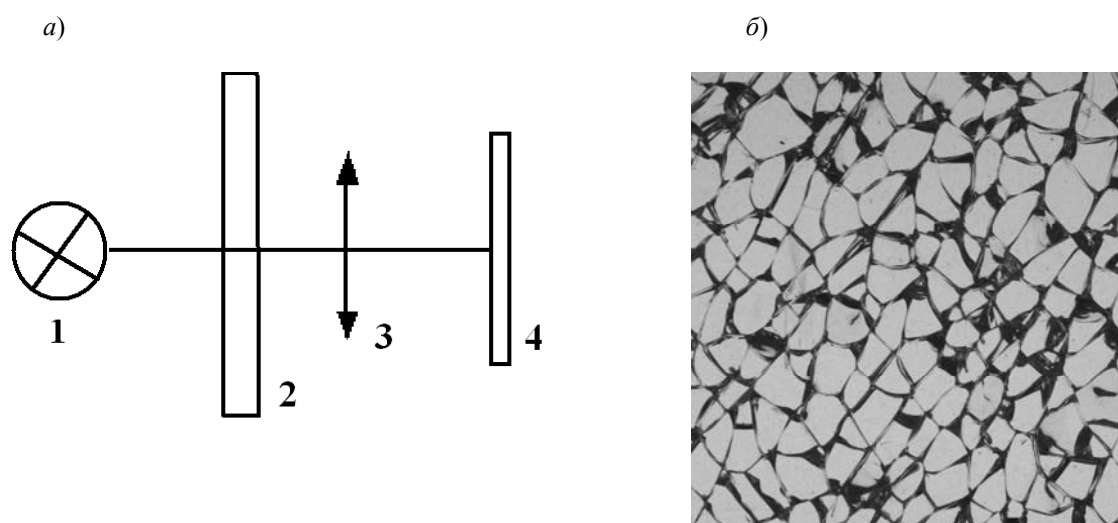


Рис. 3. Принципиальная оптическая схема установки (а) и полученное с ее помощью изображение разрушенного стекла (б): 1 – источник света; 2 – образец разрушенного листового стекла; 3 – линза; 4 – матрица фотоприемников

Рассмотрим задачу определения числа осколков на основе обработки изображения разбитого стекла. Процедура построения бинарного изображения границ объектов обычно складывается из двух последовательных операций: выделения контуров и их пороговой обработки. В результате данной операции формируется изображение, функция яркости которого существенно отличается

от нуля только в областях резких изменений яркости изображения. Пороговой обработкой из этого изображения формируется контурный объект. Выбор порогового значения яркости изображения должен производиться исходя из следующих соображений: при слишком высоком пороге могут появиться разрывы контуров, а слабые перепады яркости не будут обнаружены, а при низком контрасте из-за

шумов и неоднородности областей могут появиться ложные контуры.

На начальном этапе нахождение границ осколков осуществлялось посредством определения фиксированного значения яркости изображения, близкого к среднему арифметическому значению. Такой подход позволил, в принципе, достаточно хорошо находить границы при выполнении условия одинаковой освещенности исследуемой части разбитого стекла. Однако для неоднородно освещенного стекла применение данного подхода не оправдывает себя, и построенные границы осколков не совпадают с реальными, поэтому следующим этапом нахождения границ осколков можно использовать их поиск на основе градиента пространственной функции яркости.

Сегментация, которая представляет собой процесс разбиения изображения на группы с учетом подобия характеристик пикселей, основана на том, что каждый пиксель изображения может быть связан с некоторыми визуальными свойствами, такими как яркость, цвет и текстура. В пределах одной части объекта эти атрибуты изменяются относительно мало, тогда как при переходе через границу от одного объекта к другому обычно происходит существенное изменение одного из этих атрибутов, т. е. необходимо найти вариант разбиения изображения на такие множества пикселей, чтобы указанные ограничения удовлетворялись в максимально возможной степени. Таким образом, сегментация подразделяет изображение на составляющие его области или объекты. Та степень детализации, до которой доводится такое разделение, зависит от решаемой задачи, т. е. сегментацию следует прекратить, когда интересные объекты оказываются изолированными. В данном случае сегментация изображения производилась до тех пор, пока не выделятся все осколки разрушенного закаленного стекла. Сегментация изображения осуществлялась в два этапа. Первый этап по выделению границ проводился с использованием

алгоритма Канни [15], который состоял из пяти отдельных шагов: сглаживание или фактически размытие изображения для удаления шума; поиск градиентов, в ходе которого границы отмечаются там, где градиент изображения приобретает максимальное значение; проведение пороговой фильтрации, при которой вероятные границы определяются порогами; трассировка области неоднозначности, когда границы определяются путём подавления всех краёв, не связанных с выделенными границами. Операция сглаживания или размытия изображения для удаления шума осуществлялась с помощью функции Гаусса (фильтр Гаусса). Для нахождения максимума градиента изображения использовался алгоритм Собеля, который часто применяют в алгоритмах выделения границ и по своей сути представляет собой дискретный дифференциальный оператор, вычисляющий приближенное значение градиента яркости изображения. Результатом применения оператора Собеля в каждой точке изображения является нахождение вектора градиента яркости в этой точке либо его нормированного значения.

В результате применения алгоритма Канни к обработке изображения разбитого стекла (см. рис. 3, б) получалось изображение границ, соответствующих наибольшему значению градиента яркости (рис. 4).

Так как границы из-за несовершенного первоначального изображения (недостаточное и неравномерное освещение, блики и т. д.) имеют в некоторых местах разрывы, то возникла дополнительная задача замкнуть контуры осколков разрушенного стекла, полученных на предыдущем этапе. Эта задача частично может быть решена при применении последовательных морфологических преобразований изображения, таких как дилатация и эрозия [16]. Результат показан на рис. 5. В процессе последовательного применения данных операций происходит сглаживание острых краев. Следует

отметить, что в зависимости от размера структурного элемента этих преобразований возможно замыкание больших разрывов контуров осколков и сглаживание острых краев, что может привести

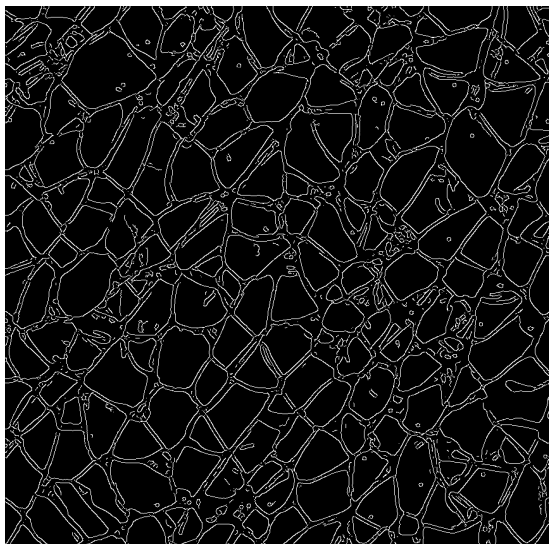


Рис. 4. Результат нахождения границ осколков

После выполненной комплексной обработки изображения статистический анализ распределения осколков разрушенного стекла не вызывает затруднений, притом каждый осколок стекла на полученном изображении вписывается в прямоугольник с минимальной остаточной площадью и производится подсчет осколков, их площади и размеров. В результате проведенных исследований разработан алгоритм и создан программный продукт для статистической обработки изображения разрушенного закаленного стекла, позволяющий производить подсчет числа и размера осколков, анализировать наличие осколков, размеры которых превышают заданные значения. На рис. 6 приведены распределение интенсивности  $I(x, y)$  света, полученное методом поляризационной интерферометрии, и наложенная на него картина разрушенного исследуемого стекла.

При этом в области больших значений напряжений, следовательно, и ве-

к значительной потере площади анализируемых осколков. При этом также возможна «потеря» изображений более мелких осколков.

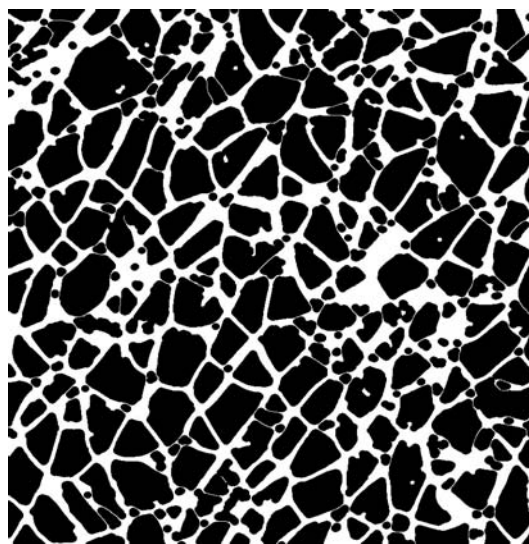


Рис. 5. Результат применения морфологической обработки

личины  $\Delta(x, y)$  регистрируются более мелкие осколки разрушенного стекла, а результаты обработки распределения интенсивности поляризованного света, прошедшего через исследуемый образец, удовлетворительно коррелировали с данными статистического анализа изображения разрушенного образца.

### Заключение

Анализируя представленные данные, можно сделать вывод, что предложенный подход дает возможность оценивать величину механических напряжений, возникающих в приповерхностном слое закаленного стекла, а разработанный алгоритм лег в основу программного продукта, позволяющего производить статистическую обработку изображений разрушенного закаленного стекла и обеспечить калибровку установки поляризационной интерферометрии неоднородных анизотропных сред и

изделий из них, а следовательно, и корректную оценку величины механических напряжений при устранении обуслов-

ленных влиянием изоклин искажений в регистрируемом распределении двулучепреломления.

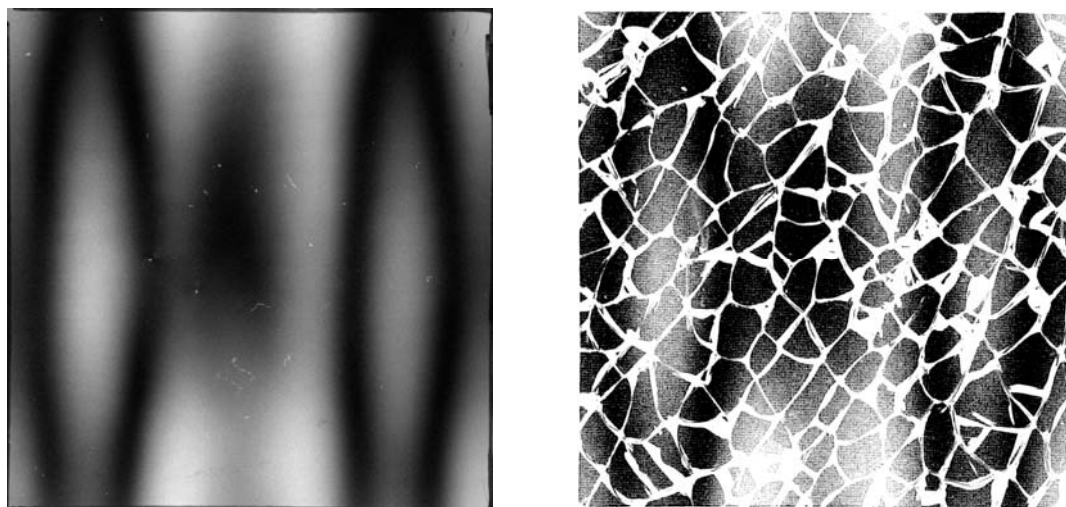


Рис. 6. Распределение интенсивности света в неоднородном закаленном стекле и наложенное на него изображение осколков разрушенного исследуемого стекла

Таким образом, измеряя распределение интенсивности света, можно анализировать и оценивать распределение

закалочных и остаточных механических напряжений в плоскости протяженных объектов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шутов, А. М.** Проблемы закалки тонкого стекла и их решение / А. М. Шутов // *Стекло и керамика*. – 1992. – № 4. – С. 8–9.
2. **Шабанов, А. Г.** Методика прогнозирования стекла при закалке / А. Г. Шабанов, А. И. Шутов, В. П. Марков // *Стекло и керамика*. – 1992. – № 5. – С. 10–11.
3. Исследование особенностей процесса производства закаленных стекол для наземного транспорта / В. М. Кульбенков [и др.] // *Вестн. Белорус.-Рос. ун-та*. – 2012. – № 1. – С. 136–146.
4. **Brodland, G. W.** Curved-ray technique to measure the stress profile in tempered glass / G. W. Brodland, A. T. Dolovich // *Opt. Eng.* – 2000. – Vol. 39, № 9. – P. 2501–2505.
5. **Хомченко, А. В.** Измерение распределения разности фаз при линейном двулучепреломлении в твердых телах с внутренними напряжениями / А. В. Хомченко, И. У. Примак, А. Н. Василенко // *Изв. ГГУ им. Ф. Скорины. Сер. Естественные науки*. – 2016. – № 3 (96). – С. 124–131.
6. Модуляционная поляриметрия термоупругости, индуцированной тепловым излучением в стекле / И. Е. Матяш [и др.] // *ФТТ*. – 2014. – Т. 56, № 7. – С. 1439–1445.
7. Gradient scattered light method for non-destructive stress profile determination in chemically strengthened glass / S. Hodemann [at al.] // *J Mater Sci*. – 2016. – Vol. 51. – P. 5962–5978.
8. A new method for tempering stress measurement in glass panels / H. Aben [at al.] // *Estonian J. of Engineering*. – 2013. – Vol. 19, № 4. – P. 292–297.
9. **Миндлин, Р.** Изучение напряжений методом фотоупругости / Р. Миндлин // *УФН*. – 1940. – Т. 23, № 1. – С. 16–66.
10. Оптические свойства кристаллов / А. Ф. Константинова [и др.]. – Минск : Наука и техника, 1995. – С. 88–94.
11. **Абен, Х. К.** Интегральная фотоупругость / Х. К. Абен. – Таллин : Валгус, 1975. – С. 95–112.



12. **Хомченко, А. В.** Поляризационная интерферометрия напряженных состояний в стекле / А. В. Хомченко // *Вестн. Магілёўскага дзярж. ун-та імя А. А. Куляшова. Сер. В.* – 2018. – № 1. – С. 66–73.
13. **Най, Дж.** Физические свойства кристаллов и их описание при помощи тензоров и матриц / Дж. Най. – Москва : Мир, 1967. – 386 с.
14. **ГОСТ 32565–2013.** Стекло безопасное для наземного транспорта. Общие технические условия. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 30 с.
15. **Canny, J.** A Computational Approach to Edge Detection / J. Canny // *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence.* – 1986. – Vol. Pami-8, № 6. – P. 679–698.
16. **Гонсалсс, Р.** Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалсс, Р. Вудс. – Москва : Техносфера, 2005. – 1072 с.

*Статья сдана в редакцию 20 декабря 2018 года*

**Александр Васильевич Хомченко**, д-р физ.-мат. наук, доц., Белорусско-Российский университет.

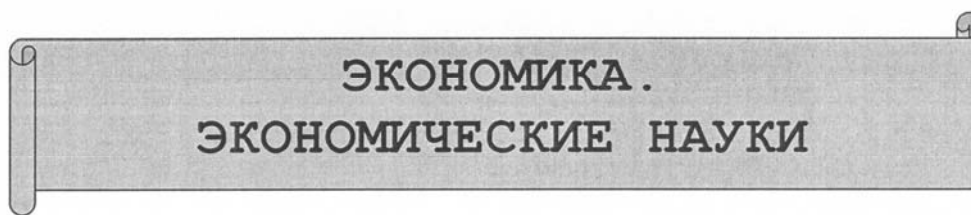
**Игорь Ульянович Примак**, канд. физ.-мат. наук, доц., Белорусско-Российский университет.

**Андрей Николаевич Василенко**, ассистент, Белорусско-Российский университет.

**Alexander Vasilyevich Khomchenko**, DSc (Physics and Mathematics), Associate Prof., Belarusian-Russian University.

**Igor Ulyanovich Primak**, PhD (Physics and Mathematics), Belarusian-Russian University.

**Andrey Nikolayevich Vasilenko**, assistant lecturer, Belarusian-Russian University.



УДК 338

*Г. Н. Блажевич, Н. С. Желток*

## О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭКОНОМИКИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ И ЕЕ ИННОВАЦИОННОЕ РАЗВИТИЕ

UDC 338

*G. N. Blazhevich, N. S. Zheltok*

## ON SOME SPECIFICS OF FUNCTIONING OF THE ECONOMY OF THE REPUBLIC OF BELARUS AND ITS INNOVATIVE DEVELOPMENT

### **Аннотация**

Показаны особенности становления экономики Республики Беларусь, в том числе развитие инновационной среды. Обозначены проблемы и пути их решения.

### **Ключевые слова:**

трансформационные условия, модель социально-экономического развития, восприимчивость экономики к инновационным процессам, построение общества знаний.

### **Abstract**

Some specifics of the formation of the economy of the Republic of Belarus, including the development of innovation environment are shown. Problems and their solutions are indicated.

### **Keywords:**

transformational conditions, model of socio-economic development, susceptibility of the economy to innovation processes, building a knowledge society.

Становление Республики Беларусь как суверенного государства проходило в сложных трансформационных условиях. Страна после развала Советского Союза получила в наследство крупные предприятия с затухающей экономикой. Это время характеризовалось товарным дефицитом. Кульминационной точкой падения производства стал 1995 г. По сравнению с 1990 г. объем производства ВВП в 1995 г. составил 65,3 %, продукции промышленности – 61,4 %, сельского хозяйства – 73,6 %, инвестиции в основной капитал – 38,5 %, уровень жизни

упал почти в 2 раза [1]. В результате разрушения экономического потенциала Беларусь подошла к черте возможной утраты национальной безопасности.

В этот сложный период была разработана модель социально-экономического развития, которая позволила не только сохранить производственный потенциал, но и придать ему динамику. Были решены две главные задачи: выход республики из социально-экономического кризиса и переход к рыночной экономике. Это стало возможным благодаря совершенствованию

системы государственного управления с ориентацией на инновационное развитие. Одним из важнейших элементов инновационного развития стало его организационно-правовое обеспечение. В этом направлении был принят ряд нормативных правовых актов, в том числе Указ Президента Республики Беларусь от 07.09.2009 г. № 441 «О стимулировании создания и развития в Республике Беларусь производств, основанных на новых высоких технологиях», Закон Республики Беларусь от 12.07.2013 г. «Об инвестициях».

Политика государства в области инноваций дает свои положительные результаты. В настоящее время в Республике Беларусь в качестве субъектов инновационной инфраструктуры зарегистрировано 14 юридических лиц, в том числе 12 технопарков, два центра трансферта технологий. Законодательством предусмотрены различные формы поддержки инновационной деятельности в виде налоговых и иных стимулирующих инструментов [2].

Тормозом в создании высокотехнологических производств является то, что сектор инновационного предпринимательства пока малочисленный и финансово несостоятельный. В условиях нарастающих глобальных процессов в мировой экономике становится очевидным: то, что приносило успех в прошлом, сегодня уже не работает. В глобальной экономике просматривается явно выраженная тенденция, что экономическая мощь идет к экономической мощи, сильный становится сильнее, а слабый слабее. Учитывая эту тенденцию, назрела необходимость разработки перспективной модели социально-экономического развития республики, основу которой должен составлять переход экономики к эффективному инновационному развитию при сохранении ее социальной ориентации.

Для решения данной глобальной задачи необходимо сделать глубокий анализ преимуществ и недостатков

действующей модели социально-экономического развития с позиций роли государства и частного бизнеса. В этом направлении поучителен опыт развитых стран, в которых экономический механизм включает не только государственное регулирование, но и рыночную саморегуляцию, чего Беларуси не хватает. Поэтому в реальности государство должно брать на себя решение тех проблем, которые не способен решить рыночный механизм. Забота государства – создать условия для функционирования рынка, чтобы все предприятия работали прибыльно.

Необходимо провести объективную инвентаризацию научно-образовательного, изобретательского и других заделов для того, чтобы ответить на следующие вопросы:

– на каких узких полях Беларусь способна освоить и производить, удерживая лидирующие позиции на рынке, новую наукоемкую продукцию;

– на каких более широких полях Республика Беларусь может быть на равных с мировыми лидерами;

– в каком направлении страна отстала, чтобы не растрачивать материальные, финансовые и людские ресурсы, а приобретать зарубежные лицензии, технологии, оборудование и готовые изделия;

– каким должен быть механизм по преодолению сложившихся негативных тенденций в социально-экономическом развитии;

– как распределены по формам собственности трудовые, финансовые, информационные, инвестиционные, инновационные и другие ресурсы страны.

Если не ответить на эти и другие вопросы, то не может быть осуществлен полный переход к инновационной экономике. В данном случае речь идет о том, насколько восприимчива белорусская экономика к инновационным процессам и какие инновационные ресурсы являются определяющими факторами экономического роста Беларуси.

Анализируя данные направления, аналитики приходят к выводу, что в Беларуси пока не произошло ожидаемое усиление интенсивных факторов экономического роста, связанное с внедрением новых технологий, более совершенного оборудования. Это связано с тем, что промышленный потенциал создавался нерыночным способом. Несмотря на то, что продукция промышленных предприятий за годы суверенитета значительно обновилась, технологии практически остались прежними, не способствующими росту качества обновленной продукции.

Производство промышленной продукции поддерживается главным образом на морально устаревшей и физически изношенной материальной базе. Износ основных фондов стал превышать критический уровень. Такое состояние связано с финансовым положением предприятий, не обладающих достаточными ресурсами для инвестирования своего развития. Это приводит к тому, что объем ВВП, формируемого в промышленности, создается относительно большим числом людей, что свидетельствует о низкой производительности труда и невысокой заработной плате.

Не в полной мере включен в действие и такой важнейший фактор экономического роста в условиях рыночной экономики, как мотивация эффективного собственника, от которой зависит результативность деятельности государства. По мнению специалистов Института экономики НАН Беларуси, «... к числу передовых стран в ведущих международных рейтингах, характеризующих конкурентоспособность, деловую среду, уровень инновационного развития, эффективность государственного управления, Беларусь не относится» [3].

В то же время следует отметить, что многие факторы, которые свойственны развитым странам в области инноваций, имеют место и в экономике Беларуси. Однако их влияние на экономику еще недостаточно. Отечественная

экономика и экономика западных стран находятся на разных этапах технологического развития. Преобладающие третий и четвертый технологические уклады представляют реальную угрозу инновационного развития экономики. Значит, вектор движения должен быть направлен на увеличение технологии пятого уклада с одновременным переходом к шестому биосовместимому технологическому укладу с использованием широкого спектра отечественных и мировых изобретений.

Международное разделение труда, концентрация промышленного и финансового потенциала в наиболее развитых странах мира не оставляют сомнений в том, что Республике Беларусь жизненно необходим мощный интеллектуальный прорыв в новейших технологиях как единственной основы социально-экономического преобразования.

Сдерживающим фактором в этом направлении является сложившаяся система управления, которая характеризуется большим числом уровней, что не способствует развитию самостоятельности субъектов хозяйствования. Системные ошибки в управлении сдерживают процесс реализации инновационных подходов, а тем более создание высокоэффективной национальной инновационной системы, которая учитывала бы глобальные процессы, происходящие в мировой экономике.

Национальная инновационная система как один из стержневых элементов всей системы государственного регулирования должна удовлетворять следующим требованиям:

- быть адекватной мировым тенденциям развития науки и технологий;
- иметь развитый по основным параметрам институт интеллектуальной собственности, современные системы менеджмента, маркетинга, коммерциализации нововведений;
- опираться на институциональные и правовые решения, поднимающие на принципиально новый уровень взаи-

моотношения науки, образования и производственной сферы.

Необходимость регулирования инновационных процессов государством вызвана их возрастающим значением для экономики и общества в целом. Именно государство должно вырабатывать национальную стратегию развития, механизм саморегулирования и становления инновационной среды. Невысокие темпы роста экономики объективно требуют поиска новых концепций, методов и технологий государственного управления.

О качестве государственного управления сказано не мало, но число проблем от этого не уменьшается. Главная причина состоит в том, что Беларусь находится все еще в состоянии неопределенности затянувшегося переходного периода. Поэтому разрабатываемые меры по развитию инновационной системы могут быть реализованы только в условиях создания соответствующего организационно-экономического механизма управления этой системой.

В механизме управления надо учитывать и то, что современная экономика все больше трансформируется от хрестоматийной экономики к экономике, где главным ориентиром становятся знания. Это фундаментальное отличие интеллектуальной экономики от экономики традиционной, которая свойственна Республике Беларусь. Не увеличивая долю интеллектуальной ренты, страна будет постоянно отставать от мировых тенденций.

Чтобы экономика динамично и устойчиво развивалась, государству самому надо осваивать функцию развития. Эта функция должна включать решение следующих проблем: обеспечение эффективной всеобщей доступности инновационных знаний, создание системы услуг для инновационного предпринимательства. Таким образом, государство, накапливая интеллектуальный потенциал, способно будет создавать более высокую добавленную

стоимость, что повысит эффективность инновационной деятельности.

Жизненный опыт подсказывает, что без систематического осуществления инноваций немислимо само существование предприятий. Поэтому главным направлением в развитии инновационной деятельности является создание высокотехнологичных производств. Такой подход должен стать определяющим. К примеру, по оценкам экспертов, рынок высокотехнологичной продукции к 2030 г. возрастет до 10...12 трлн долл. США, в то время как рынок сырьевых ресурсов составит 1,5 трлн долл. США [4]. Поэтому государству очень важно подсказывать участникам рынка приоритетные направления, в рамках которых можно ожидать увеличение эффекта. Оно должно предоставлять гарантии под инвестиции в рискованные и особенно капиталоемкие нововведения. При этом должен действовать механизм реализации этого нововведения, чтобы снизить затраты на научно-исследовательские разработки.

Важную роль в современных условиях играют инновационные ресурсы страны, позволяющие обеспечить технологический прорыв в приоритетных направлениях экономического развития и увеличить масштаб экономического роста. Инновационные ресурсы во всех странах являются в настоящее время определяющим фактором экономического роста. Более 70 % прироста ВВП в развитых странах обеспечивается за счёт новых или усовершенствованных технологий. Поэтому решение задачи по переводу Республики Беларусь к «новой экономике», основанной на знаниях и на новых технологиях, предполагает усиление внимания к рациональному использованию инновационных ресурсов. Такие ресурсы, к примеру, находятся в системе оборонно-промышленного комплекса, который продолжает оставаться одной из наиболее высокотехнологичных и значимых отраслей

отечественной промышленности.

Грамотно управляя инновационными ресурсами, государство может увеличить долю интеллектуальной ренты. Однако на данном этапе этому не способствует сложившийся низкий уровень наукоёмкости ВВП. В последние годы он не превышает 0,7 %, в то время как среднеевропейское значение данного показателя составляет более 2,2 %. Страны – технологические лидеры поддерживают уровень 2...4 %. Например, уровень наукоёмкости в Японии составляет 3,6 %, в Финляндии – 3,17 %, в США – 2,7 %, в Германии – 2,84 %, в Чехии – 2,01 % [5].

Негативные тенденции в научной среде носят кумулятивный результат. Низкая доля в ВВП добавленной стоимости не способствует созданию высокотехнологичной инновационной продукции. Для сокращения разрыва в инновационном развитии необходимо обеспечить преодоление критического уровня наукоёмкости ВВП. Он составляет 1,0 %, что отражает относительную слабость национального научно-технологического потенциала. В среднесрочной перспективе Беларуси надо увеличить долю затрат на науку в ВВП до 2 %, что позволит сократить разрыв в качественных характеристиках состояния научной и технической сферы и приблизит республику к высоко развитым странам.

Практика этих стран свидетельствует, что существует тесная взаимосвязь между темпами экономического развития и размерами финансирования научных исследований. Рост экономики страны и ее инновационное развитие будут тем успешнее, чем больший процент ВВП она будет тратить на науку. Низкие объемы финансирования научной сферы могут привести к разрушению научно-технического потенциала и прежде всего его кадровой составляющей. Поэтому расходы на науку следует рассматривать как прямые инвестиции в развитие человеческого потенциала.

В мировом рейтинге Республика Беларусь пока занимает 104 место по темпам роста ВВП на одного занятого в экономике [6].

Не увеличивая расходы на науку, Беларусь тем самым консервирует технологическую отсталость. А в условиях технологической отсталости массовое внедрение инноваций невозможно. Для инновационного развития требуется пройти путь модернизации, в основу которой необходимо положить стратегию инновационно-технологического прорыва. Опыт Японии, Южной Кореи и Китая показал, что, идя по этому пути, им удалось присоединиться к числу развитых стран, из чего можно заключить, что те, кто умеет создавать новые технологии, применять новые знания, выигрывают.

В условиях модернизации и инновационного развития экономики возрастает роль и значение образования как обязательного условия социально-экономических преобразований. Тенденции и проблемы, которые имеют место в белорусской системе образования, находятся в русле общемировых процессов развития национальной системы образования. В то же время в Республике Беларусь налицо парадоксы в реформе системы образования, потому что, с одной стороны, образование – это пока еще сфера, где страна обладает достаточным потенциалом и может конкурировать на равных с крупнейшими мировыми державами, с другой – экономические и социальные показатели развития образования в Беларуси не сопоставимы с высоко развитыми странами.

Так, в рейтинге по уровню образования Беларусь занимает 20 место; по глобальному индексу творческих способностей – 37 место; по уровню индекса человеческого развития – 52 место. В то же время по номинальному ВВП на душу населения Беларусь занимает лишь 81 место (5779 долл. США). Высокий уровень образования дает мень-

ший экономический эффект, чем в других странах [7].

Несмотря на высокий образовательный уровень, в республике дешевая рабочая сила, что приводит к низкой производительности труда, подрывает мотивацию и творческую инициативу, а перекосы в заработной плате служат причиной того, что высокая оплата низкоквалифицированного специалиста соседствует с низкой оплатой высококвалифицированного специалиста [8].

Неясность перспектив реформы образования в целом и вузовского образования в частности не способствует пониманию и конструктивному обсуждению проблемы. И аргументы типа «нам не нужно столько специалистов с высшим образованием» представляются недалекими. В условиях развития информационного общества, все ускоряющегося внедрения новых технологий во все сферы потребность в высокопрофессиональных, образованных специалистах будет постоянно возрастать.

Более того, просматривается тенденция, что у молодежи не воспитывается интерес к собственному научному труду, процессу научного познания. Молодые люди не умеют порой писать и аргументировать свои доводы, работать с первоисточниками. Если не учитывать и эту тенденцию, то можно столкнуться с дефицитом компетентности, вытекающей из функциональной неграмотности. Поэтому образовательный уровень молодежи необходимо рассматривать как один из показателей оценки инновационного развития республики.

Данная проблема актуальна не только для Беларуси. В области научных кадров в развитых западных странах можно проследить аналогичные тенденции. Поэтому в программу обучения необходимо вводить курсы, которые прививали бы студентам навыки проведения научных исследований, что будет способствовать развитию интереса у них к такой деятельности.

Формированию инновационной активности не способствует снижение общей численности исследователей. Продолжается процесс вымывания интеллектуального ядра научных кадров высшей квалификации. Так, за три года количество докторов наук сократилось с 671 до 631 человека, из них старше 60 лет – 498 (78,9 %). Несколько более благополучная ситуация с кандидатами наук: при сокращении с 2867 до 2813 человек только 34,6 % от общего числа старше 60 лет [9].

Приведенная статистика свидетельствует о необходимости укрепления кадрового потенциала науки и системы образования. Наука и масштаб распространения научного мировоззрения способны оказывать сильное воздействие на механизм управления социально-экономическими процессами, на их динамику, раскрепощающую или сковывающую развитие производительных сил. Не разработав эффективную подготовку и поддержку научных кадров, можно потерять интеллектуальный потенциал. Более того, старение научных кадров создает их дефицит, который невозможно будет восполнить теми, кто сейчас учится.

Статистика подтверждает, что страна имеет большое количество высокообразованных людей, но государственная система не умеет сохранить их для службы на благо Отечества. В республике идет процесс утечки интеллекта. По международным критериям способность стран сохранять свой интеллектуальный потенциал оценивается по семибалльной системе. В Беларуси он составляет 2,4 балла. Поэтому важной задачей для государства является сохранение интеллекта, особенно в научной среде, которая обеспечивает высокий уровень в создании инновационного потенциала национальной науки. Его утечка или так называемая научная мобильность определяется общим уровнем жизни и состоянием научной базы. Пока эти показатели не в пользу республики.

Страна с невысокой эффективностью в экономическом развитии практически финансирует развитые страны. Теряются значительные средства, вложенные в интеллектуальную элиту. Республика несет значительные потери из-за недополучения ВВП. Поэтому сохранение элиты и создание инновационной привлекательности – это в первую очередь вопрос выживания нации. В белорусском обществе должно прочно утвердиться общее представление о том, что создание и поддержание национальной инновационной способности – один из приоритетов государства и общества в целом. Только на основе новых знаний и инновационных идей можно обеспечить динамику экономического роста.

На сегодняшний день экономический рост в мировом сообществе принято рассматривать не в качестве самоцели, а в качестве средств достижения целей в области развития и саморазвития человека. Поэтому в центре внимания социально-экономического развития должен стоять вопрос о том, как экономический рост может содействовать устойчивому и поступательному развитию человека. Мировой опыт свидетельствует, что наибольший эффект в экономическом развитии достигнут в тех странах, где в течение длительного времени реализуется эффективная национальная политика человеческих ресурсов.

Одним из факторов в реализации данного направления выступает обеспечение перелома негативных тенденций в демографических процессах. Сокращение в республике численности населения и уменьшение количества молодёжи создают опасность в социально-экономическом, особенно в инновационном, развитии. В связи с постарением населения может возникнуть дефицит рабочей силы, увеличиться демографическая нагрузка на трудоспособное население и на систему здравоохранения. Страна может стать перед пробле-

мой выплаты пенсий и социальных пособий. Чтобы этого не произошло, необходимо выработать стратегические приоритеты. В социальной сфере: обеспечение стабилизации численности населения с формированием предпосылок последующего демографического роста; повышение доходов и качества жизни населения. В экономической сфере: обеспечение развития науки и научного обслуживания как реальной базы реконструкции и модернизации производства; опережающее развитие высокотехнологичных наукоемких отраслей и производств, отвечающих современным мировым тенденциям.

В результате реализации данных стратегических приоритетов необходимо параллельно повысить роль рыночных механизмов, уменьшить бюрократическое воздействие на субъекты хозяйствования. Это даст мощный толчок развитию малого и среднего бизнеса, позволит рыночными методами перераспределять трудовые ресурсы с неэффективных предприятий в востребованные сектора экономики.

Рыночная экономика не может нормально функционировать без постоянного воспроизводства своей питательной среды – малого бизнеса. Малое предпринимательство по накопленному в нем человеческому потенциалу, запасу идей, масштабом рынка, который ему предстоит освоить, призвано стать важнейшим фактором рыночных преобразований и обеспечения достойных условий жизни населения.

В целях оказания содействия развитию малого и среднего бизнеса в республике сформировалась сеть субъектов инфраструктуры поддержки малого и среднего предпринимательства. Их деятельность регламентируется Законом Республики Беларусь от 1 июня 2010 г. «О поддержке малого и среднего предпринимательства», Указом Президента Республики Беларусь от 21 мая 2009 г. № 255 «О некоторых мерах государственной поддержки малого и среднего



предпринимательства» и постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 30 декабря 2010 г. № 1911 «О мерах по реализации Закона Республики Беларусь «О поддержке малого и среднего предпринимательства».

Малое и среднее предпринимательство является важным элементом национальной политики любой страны. Так, в США, Германии, Италии доля малого и среднего бизнеса в структуре ВВП составляет более 50 %, число занятых в этом секторе – более 60 % [10]. В Республике Беларусь эти цифры находятся в пределах 28 и 32 % соответственно. Даже при таком соотношении малые предприятия в республике выполняют ряд важнейших социально-экономических функций, таких как обеспечение занятости, формирование конкурентной среды, поддерживание инновационной активности, смягчение социального неравенства. Поэтому роль малого бизнеса должна постоянно возрастать. Это источник новых рабочих мест, поставщик денежных ресурсов в региональные бюджеты и в бюджет государства, катализатор формирования устойчивого со-

циального слоя населения. Такому развитию должна способствовать правовая, организационная и финансовая поддержка малого и среднего бизнеса.

Еще одним приоритетом в развитии малого и среднего бизнеса должно стать целенаправленное формирование информационных потоков и положительное формирование образа предпринимателей, обеспечивающих эффективную занятость. Именно информационная поддержка, реализованная в форме консультирования, обучения, позволит обеспечить информационные потребности предпринимателей. Возможны и другие формы предоставления информации, которыми могут пользоваться малые и средние предприятия. Это наличие информации в сети Интернет, базы данных в электронной форме (печатные, справочные, пресса), консультации в устной форме.

Таким образом, определив факторы, сдерживающие или ускоряющие экономическое развитие, можно более четко сформулировать приоритеты и реализовать их в системе совершенствования инновационной деятельности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Национальная экономика Беларуси : учебник / В. Н. Шимов [и др.] ; под ред. В. Н. Шимова. – 4-е изд., перераб. и доп. – Минск : БГЭУ, 2012. – 236 с.
2. **Крупский, Д. М.** Инновационное развитие Республики Беларусь : итоги, проблемы и перспективы / Д. М. Крупский // Экон. бюл. – 2015. – № 4. – С. 4–6.
3. **Долинина, Г. Н.** Беларусь в кругу сопредельных стран: институциональные основы национальной конкурентоспособности / Г. Н. Долинина // Белорус. экон. журн. – 2017. – № 2. – С. 114–137.
4. **Ляхович, С. А.** Новые инструменты инновационной политики в реализации программы технологического реинжиниринга промышленных предприятий / С. А. Ляхович // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2014. – № 3. – С. 133.
5. **Барейша, А. С.** Венчурное финансирование как драйвер развития инновационной экономики Республики Беларусь / А. С. Барейша // Экон. бюл. – 2017. – № 11. – С. 4–9.
6. **Протасова, М. А.** Инновационный потенциал Беларуси и его оценка в международном рейтинге инноваций / М. А. Протасова // Экон. бюл. – 2017. – № 11. – С. 16–24.
7. **Коляда, Е. А.** Проблемы высшего образования и развития экономики / Е. А. Коляда // Экон. бюл. – 2017. – № 6. – С. 17–25.
8. **Банкевич, Е. В.** Инновационное развитие Беларуси – размышления о выборе пути построения экономики знаний / Е. В. Банкевич // Белорус. экон. журн. – 2015. – № 1. – С. 146–150.
9. **Кристонович, С. А.** Сохранение национального человеческого капитала как фактор экономической безопасности / С. А. Кристонович // Белорус. экон. журн. – 2017. – № 2. – С. 23–26.

10. **Лю Сяомей.** Малый и средний бизнес в Китае и Республике Беларусь : сравнительный анализ условий развития / Лю Сяомей // Белорус. экон. журн. – 2014. – № 2. – С. 116.

*Статья сдана в редакцию 20 декабря 2018 года*

**Галина Николаевна Блажевич**, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет.  
E-mail: mari.marusia27@tut.by.

**Николай Станиславович Желток**, канд. экон. наук, доц., Белорусско-Российский университет.  
Тел.: +375-293-56-55-41.

**Galina Nikolaevna Blazhevich**, senior lecturer, Belarusian-Russian University. E-mail: mari.marusia27@tut.by.  
**Nikolai Stanislavovich Zheltok**, PhD (Economics), Associate Prof., Belarusian-Russian University.  
Phone: +375-293-56-55-41.

---

УДК 338.

*В. А. Ливинская, С. Л. Комарова*

## ОЦЕНКА РЕГИОНАЛЬНЫХ РАЗЛИЧИЙ, ВЛИЯЮЩИХ НА ВНЕШНЮЮ МИГРАЦИЮ

---

UDC 338.

*V. A. Livinskaya, S. L. Komarova*

## ASSESSMENT OF REGIONAL DIFFERENCES AFFECTING EXTERNAL MIGRATION

---

### **Аннотация**

В последние несколько лет внешняя трудовая миграция стала серьезной проблемой для экономики Республики Беларусь. Выдвинуто предположение, что причины миграции связаны со снижением социальных показателей в ряде регионов Республики Беларусь, упрощением порядка получения гражданства Российской Федерации для русскоязычных граждан. Проведена оценка конкурентных позиций приграничных регионов с использованием функции принадлежности. Выявлены лидеры и аутсайдеры в рейтинге регионов по социальным показателям.

### **Ключевые слова:**

миграция, регион, социальные показатели, качество жизни, функция принадлежности, агрегирующая функция.

### **Abstract**

In the past few years, external labor migration has become a serious problem for the economy of the Republic of Belarus. It has been assumed that the reasons for the migration are associated with a decrease in social indicators in a number of regions of the Republic of Belarus, and the simplification of the procedure for obtaining citizenship of the Russian Federation for Russian-speaking people. An evaluation of competitive positions of the border regions was carried out using the membership function. Leaders and outsiders were identified in the ranking of regions based on social indicators.

### **Keywords:**

migration, region, social indicators, quality of life, membership function, aggregate function.

---

Открытое экономическое пространство предполагает свободное перемещение трудовых ресурсов в рамках Союзного государства Беларуси и России, что является как положительным аспектом, так и отрицательным для экономики Республики Беларусь. С одной стороны, возможность трудоустройства на предприятиях соседнего государства и возможность получения образования в ведущих вузах России можно рассматривать как положительный аспект. Но, с другой стороны, увеличивается вероятность, что полученные знания и результаты труда будут использованы для

развития экономики другой страны. Об этом говорил Президент Республики Беларусь А. Г. Лукашенко на встрече с молодежью на праздновании 100-летия комсомола в октябре 2018 г.

Наблюдается и такая ситуация, когда квалифицированные кадры, получившие образование в Республике Беларусь, ищут более привлекательные, с точки зрения оплаты и карьерного роста, места для реализации своих профессиональных качеств. Большое количество людей трудоспособного возраста покидают пределы Республики Беларусь в поисках трудоустройства в связи

с отсутствием рабочих мест с достойной оплатой труда. Средняя зарплата, по данным Национального статистического комитета Республики Беларусь, в 2018 г. не достигла уровня в 500 долл. ни в одном из районных центрах приграничных с Россией регионов.

Процесс трудовой миграции,

по данным последних лет, становится более интенсивным. На рис. 1 представлена динамика внешней миграции из Республики Беларусь в Российскую Федерацию за период с 2008 по 2017 гг. по данным Федеральной службы государственной статистики Российской Федерации [1].

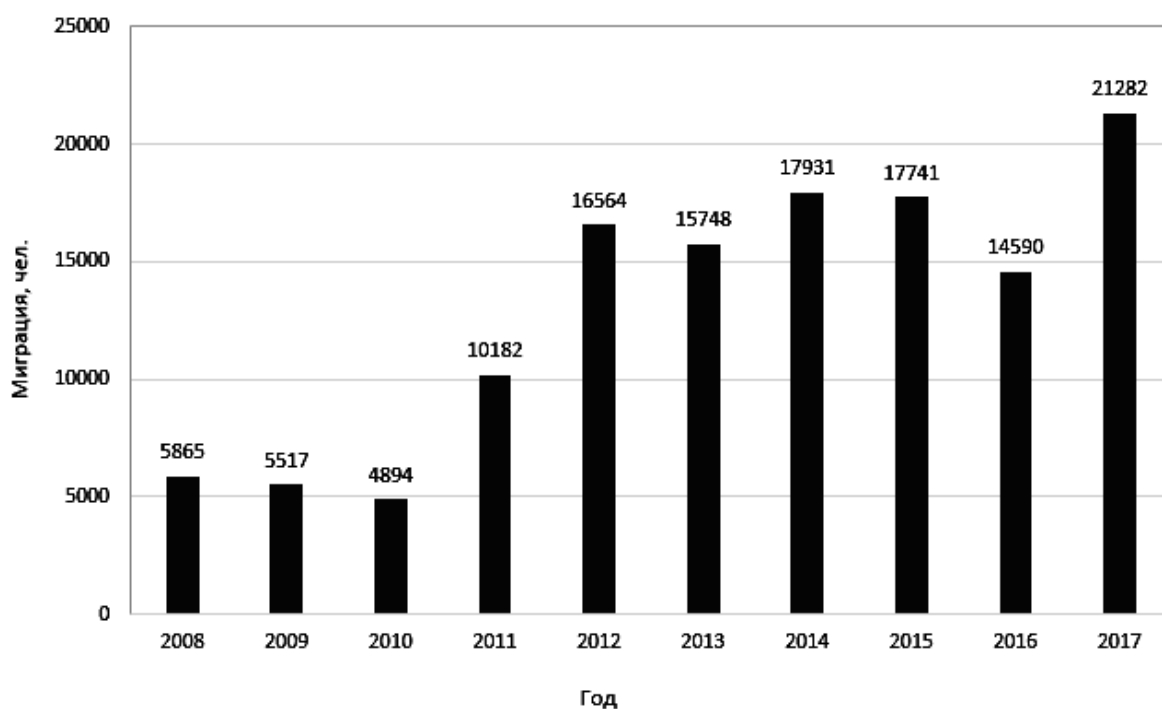


Рис. 1. Миграция из Республики Беларусь в Российскую Федерацию

Прослеживается тенденция роста выезжающих граждан в Россию из Республики Беларусь начиная с 2010 г. Влияние на этот рост оказывают различные факторы: от снижения уровня реальных доходов до сокращения количества предложений для высококвалифицированных специалистов на рынке труда.

Демографическая ситуация, сложившаяся в последнее десятилетие на постсоветском пространстве, привела к сокращению численности трудовых ресурсов, и практически все государства сталкиваются с необходимостью находить решения этой проблемы.

В Российской Федерации с 2008 г. осуществляется государственный еже-

годный мониторинг потребности организаций в работниках для замещения вакантных рабочих мест, что позволяет привлекать мигрантов из стран СНГ.

Благодаря качественному образованию, высокой квалификации и свободному владению русским языком специалисты из Республики Беларусь востребованы в России. Сложная ситуация в экономике Республики Беларусь, особенно в промышленности, в последние несколько лет позволила уехать многим специалистам в Российскую Федерацию. Люди становились трудовыми мигрантами, соглашаясь на высокую оплату труда. Дальнейшим катализатором процесса трудовой миграции

может послужить новая редакция закона об упрощенном порядке получения гражданства для русскоязычных иностранцев, принятого в Российской Федерации в 2018 г.

Экономика Республики Беларусь может столкнуться с проблемами, вызванными оттоком высококвалифицированных специалистов на работу в другие государства. Есть еще один важный аспект, он связан с выездом молодежи, выбирающей Российскую Федерацию для получения высшего образования. Существует высокий риск невозврата этой части населения в Республику Беларусь из-за сложной экономической ситуации внутри страны.

Для снижения данного риска необходимо разработать систему мероприятий по контролю за динамикой уровня жизни и по снижению факторов, вызывающих ее отрицательную тенденцию в отдельных регионах Беларуси. Особо уязвимыми являются регионы, граничащие с Российской Федерацией (Могилевская, Гомельская и Витебская области).

В преддверии V Форума регионов России и Республики Беларусь возник интерес к сопоставлению статистических данных по оценке показателей, характеризующих уровень жизни в приграничных областях, публикуемых в открытой печати.

По данным, представленным на официальном сайте Национального статистического комитета Республики Беларусь (НСК РБ) [2] и на официальном сайте Федеральной службы государственной статистики Российской Федерации, проведем сравнение конкурентоспособности приграничных областей по социальным показателям.

Анализируя информацию, размещенную на статистических сайтах, было выявлено, что жители Витебской, Могилевской и Гомельской областей чаще всего мигрируют в ближайшие приграничные регионы Российской Федерации (в Брянскую и Смоленскую области).

Было решено выделить одиннадцать социальных показателей, которые влияют на уровень привлекательности для жизни в населенных пунктах Республики Беларусь и Российской Федерации.

Эти показатели были разбиты на три блока. На их основе рассчитывается конкурентоспособность белорусских и российских регионов.

В качестве исходной информации выбраны показатели, характеризующие социальную сферу, качество жизни, показатели уровня жизни за период 2014–2016 гг.

В исследовании предложен расчет конкурентоспособности регионов по социальным показателям с применением функции принадлежности, которая позволяет использовать в расчетах параметры с различными единицами измерения путем преобразования натуральных единиц измерения в единую безразмерную шкалу принадлежности для получения сводного интегрального показателя конкурентоспособности регионов.

Использование шкалы устанавливает соответствие между социально-экономическими показателями, выраженными количественно, и психологическими параметрами оценки, выраженными лингвистическими терминами.

Предлагаемый метод оценки конкурентоспособности региона по социальным показателям можно разбить на следующие этапы.

*Этап 1.* задается функция принадлежности  $\mu_{ij}$ , значение которой характеризует степень удовлетворения в  $i$ -й характеристике  $j$ -м показателе. Причем если функция равна 0, то значение  $i$ -й характеристики неудовлетворительно (соответствует самому нежелательному значению параметра), а если 1, то потребность в  $i$ -й характеристике удовлетворена полностью. Любой исследуемый параметр может быть включен в функцию принадлежности и должны быть заданы максимальные и минимальные его значения.

Но есть параметры, к шкалированию которых нужно подходить осторожно. Например, параметр смертность (в расчете на 10 000 человек), соответствующий нулевому значению – это самый благоприятный вариант для его характеристики и значение для него соответствует единице.

*Этап 2.* Определяются значения выбранных показателей, характеризующих социальные показатели регионов, соответствующие узловым значениям функции принадлежности, что способствует использованию данной функции для оценки параметров различной размерности и порядка.

В табл. 1 представлены данные за 2016 г. по Могилевской, Гомельской, Витебской, Смоленской и Брянской областям.

*Этап 3.* На основе полученных значений подбираются коэффициенты функции, аппроксимирующей наилучшим образом узловые точки.

*Этап 4.* Подставляются в полученные аппроксимирующие функции значения показателей и находятся значения функции принадлежности.

*Этап 5.* Аналогичным образом строится функция принадлежности для каждого показателя. Для каждого блока показателей находятся агрегирующие функции  $\mu$ , которые предполагается рассчитывать как среднее геометрическое значение функции принадлежности по отдельным признакам с учетом количества показателей, входящих в соответствующий блок.

Табл. 1. Исходные данные для оценки конкурентоспособности регионов за 2016 г.

Показатель	Область				
	Могилевская	Гомельская	Витебская	Смоленская	Брянская
<b>Социальная сфера</b>					
Уровень безработицы, % к численности населения	0,9	1	1	5,3	5
Обеспеченность врачами (в расчете на 10 000 чел.)	35,8	40,5	39,3	37	39,1
<b>Качество жизни</b>					
Коэффициент младенческой смертности (в расчете на 10 000 чел.)	3,0	2,8	2,8	6,50	7,6
Разность продолжительности жизни женщин и мужчин, лет	10	10,3	11,2	10,79	11,89
Коэффициент естественного прироста (в расчете на 10 000 чел.)	-1,562	-0,307	-4,162	-4,5	-4,7
Ожидаемая продолжительность жизни при рождении, лет	73,3	73,5	73,3	69,98	70,92
Смертность (в расчете на 10 000 чел.)	12	12,9	11,1	16,17	15,6
Заболеваемость населения (в расчете на 10 000 чел.)	627	807	755	722	776
<b>Показатели уровня жизни</b>					
Объем платных услуг на душу населения, рос. р.	19 887,6	21 249,9	21 519,9	33 558,0	58 761,0
Среднедушевые доходы, рос. р.	13 364	13 578	13 755	24 469	25 336
Изменение реальной заработной платы, %	94,1	92,9	94,5	103	106,6

Значение агрегирующей функции является средним геометрическим значением агрегирующих функций при-

надлежности по различным группам параметров.

Значение агрегирующей функции

принадлежности позволит оценить конкурентные позиции региона. Чем выше значение агрегирующей функции принадлежности, тем регион привлекательнее для проживания с точки зрения исследуемых параметров.

В табл. 2 представлены значения всех трех групп показателей, а также

рассчитанные значения агрегирующей функции принадлежности, соответствующие показателям.

На рис. 2 приведено итоговое сравнение приграничных регионов Республики Беларусь и Российской Федерации по всем группам показателей за 2016 г.

Табл. 2. Результаты расчета значений функции принадлежности

Показатель	Область									
	Могилевская		Гомельская		Витебская		Смоленская		Брянская	
	х	μ	х	μ	х	μ	х	μ	х	μ
<b>Социальная сфера</b>										
Уровень безработицы	0,9	0,384	1	0,249	1	0,249	5,3	0,187	5	0,248
Обеспеченность врачами	35,8	0,287	40,5	0,503	39,3	0,449	37	0,343	39,1	0,440
<b>Качество жизни</b>										
Коэффициент младенческой смертности	3,0	0,403	2,8	0,789	2,8	0,789	6,50	0,330	7,6	0,143
Разность продолжительности жизни женщин и мужчин	10	0,568	10,3	0,535	11,2	0,361	10,79	0,469	11,89	0,309
Коэффициент естественного прироста	-1,562	0,664	-0,307	0,7199	-4,162	0,456	-4,5	0,409	-4,7	0,383
Ожидаемая продолжительность жизни	73,3	0,166	73,5	0,171	73,3	0,166	69,98	0,143	70,92	0,150
Смертность	12	0,495	12,9	0,201	11,1	0,789	16,17	0,284	15,6	0,182
Заболеваемость населения	627	0,495	807	0,237	755	0,224	722	0,336	776	0,301
<b>Показатели уровня жизни</b>										
Объем платных услуг на душу населения, рос. р.	19 888	0,167	21 250	0,168	21 520	0,169	33 558	0,194	58 761	0,303
Среднедушевые доходы, рос. р.	13 364	0,057	13 578	0,067	13 755	0,076	24 469	0,537	25 336	0,570
Изменение реальной заработной платы, %	94,1	0,293	92,9	0,271	94,5	0,304	103	0,348	106,6	0,388
<b>Агрегирующая функция социальных показателей</b>		0,332		0,354		0,334		0,253		0,331
<b>Агрегирующая функция показателей качества жизни</b>		0,428		0,368		0,395		0,309		0,228
<b>Агрегирующая функция показателей уровня жизни</b>		0,141		0,145		0,157		0,331		0,406
<b>Агрегирующая функция принадлежности</b>		0,272		0,267		0,275		0,296		0,313

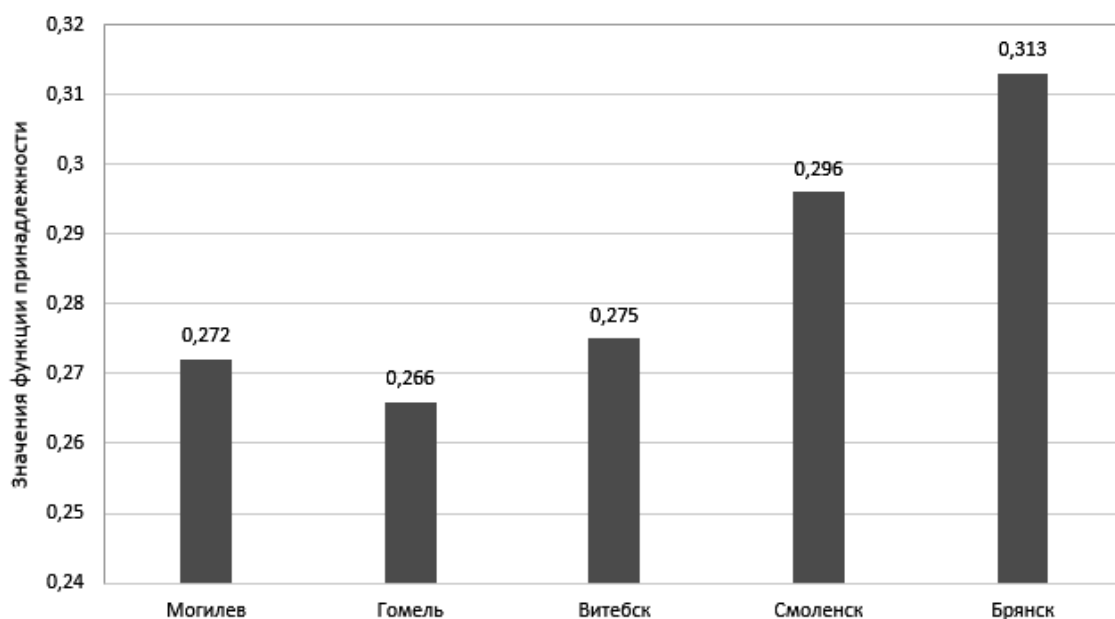


Рис. 2. Итоговая агрегирующая функция в 2016 г.

Значения агрегирующей функции для всех регионов, согласно границам вербально-числовой шкалы Харрингтона [3], имеют значения, соответствующие понятию «плохо» (0,2...0,37), и хотя Брянская область имеет самое высокое значение функции принадлежности, она также не достигла нижней границы понятия «удовлетворительно» (0,37...0,63).

Такая ситуация объясняет всплеск миграции из Республики Беларусь в Российскую Федерацию в 2017 г. (прирост 45 % по сравнению с 2016 г.).

В исследовании анализировалась динамика показателя оценки конкурентоспособности за 3 года. Ситуация в 2014–2016 гг. отображена на рис. 3.

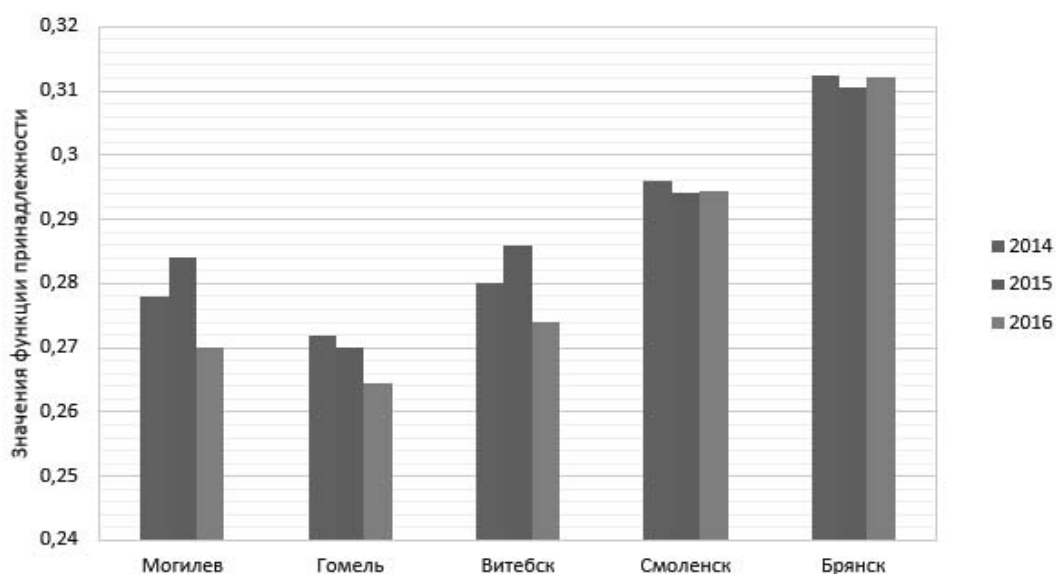


Рис. 3. Динамика итоговой агрегирующей функции



При сопоставлении расчетов для областей Республики Беларусь был выявлен существенный разброс значений функции, причем в 2016 г. они были наименьшими. Есть основания предположить, что ухудшение ситуации было вызвано скрытой безработицей и снижением реальной заработной платы. В то время как российские регионы демонстрируют относительную стабильность в этот период, несмотря на внешнее давление и санкции, объявленные России со стороны ряда европейских государств и США.

Несмотря на социальную ориентированность экономики Республики Беларусь, уровень жизни в большинстве регионов снижается. Сложная экономическая ситуация в промышленности вызвана низкой конкурентоспособностью продукции вследствие высокой себестоимости и слабого уровня развития производственных технологий.

По данным статистики, привлекательность белорусских регионов в последние 3 года в основном снижается. Причиной этого становится низкая оплата труда квалифицированных работников, а также сложная экономическая ситуация на предприятиях промышленного сектора. Некоторые предприятия находятся в трудных условиях уже несколько лет, проходя процедуру банкротства, и приход антикризисного руководства не всегда может быстро вернуть организации былые позиции.

Предприятия, которые прошли реконструкцию и модернизацию, утратили

свои рыночные позиции и связи. Для освоения новой рыночной ниши менеджерам высшего звена необходимо время на поиск поставщиков сырья, на привлечение специалистов по обучению кадров для освоения нового оборудования, на формирование портфеля заказов для выхода на запланированные производственные мощности.

Квалифицированные кадры не всегда готовы переждать модернизацию и довольствоваться низкой заработной платой и соглашаются на выгодные предложения в соседнем государстве. Это и есть одна из причин миграционных процессов в Беларуси. Автоматически возникает вторая проблема – отсутствия института наставничества. Выпускники высших учебных заведений Республики Беларусь сталкиваются с проблемой отсутствия возможности перенять опыт у профессионалов. Эти трудности также провоцируют миграционные процессы.

Для снижения темпов роста внешней миграции руководителям регионов Республики Беларусь необходимо уделять больше внимания показателям социальной сферы. Если проблему роста доходов населения можно решить в краткосрочный период (изыскав дополнительные финансовые ресурсы), то проблему сохранения кадров решают не за один год. На подготовку квалифицированного работника может уйти минимум 7 лет (обучение и приобретение практического опыта).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gks.ru/>. – Дата доступа: 20.02.2018.
2. Национальный статистический комитет Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.belstat.gov.by/>. – Дата доступа: 15.02.2018.
3. **Ливинская, В. А.** Использование функции желательности Харрингтона для оценки регионов с позиции привлекательности / В. А. Ливинская, С. Л. Комарова // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2018. – № 2 (59). – С. 55–64.
4. **Точицкая, И.** Конкурентоспособность регионов Беларуси : общий обзор / И. Точицкая, И. Пелипась // Рабочий материал Исследовательского центра ИПМ. – Режим доступа: <http://www.research.by/webroot/delivery/files/wp2013r03.pdf>. – Дата доступа: 20.02.2018.

5. **Барбашова, Е. В.** Статистический подход к формированию функции желательности в задачах экономико-математического моделирования / Е. В. Барбашова, В. Г. Шуметов // Вестн. Орлов. гос. ун-та экономики и торговли. – 2015. – № 2 (32). – С. 94–100.

6. **Калинский, О. И.** Использование функции желательности Харрингтона для качественной оценки деловой репутации (гудвилла) предприятия (на примере российских металлургических заводов) / О. И. Калинский, О. Ю. Михайлова // Бюл. науки и практики. – 2016. – № 1. – С. 25–33.

7. **Маковская, Н. В.** Оценка удовлетворенности работой в условиях национальной экономики Беларуси / Н. В. Маковская, Т. И. Чегерова // Экономика и банки. – 2017. – № 2. – С. 72–78.

8. **Маковская, Н. В.** Социальные риски и принципы эффективного управления человеческими ресурсами в Белоруссии / Н. В. Маковская, Т. И. Чегерова // Менеджмент в России и за рубежом. – 2018. – № 1.

9. **Шуметов, В. Г.** О преобразовании социально-экономических показателей в безразмерные индексы в задачах математического моделирования / В. Г. Шуметов // Среднерус. вестн. общественных наук. – 2014. – № 4. – С. 102–111.

*Статья сдана в редакцию 20 декабря 2018 года*

**Виктория Александровна Ливинская**, канд. физ.-мат. наук, доц., Белорусско-Российский университет. E-mail: viktorijalivinskaya@mail.ru.

**Светлана Леонидовна Комарова**, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет. E-mail: dasha\_sak@mail.ru.

**Viktoriya Aleksandrovna Livinskaya**, PhD (Physics & Mathematics), Associate Prof., Belarusian-Russian University. E-mail: viktorijalivinskaya@mail.ru.

**Svetlana Leonidovna Komarova**, senior lecturer, Belarusian-Russian University. E-mail: dasha\_sak@mail.ru.

---

---

УДК 338.2

*Т. М. Лобанова, В. А. Ливинская*

## КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ПРИВЛЕКАТЕЛЬНОСТИ ИНВЕСТИЦИОННЫХ ПРЕДЛОЖЕНИЙ

---

UDC 338.2

*T. M. Lobanova, V. A. Livinskaya*

## COMPLEX EVALUATION OF THE ATTRACTIVENESS OF INVESTMENT PROPOSALS

---

### **Аннотация**

Раскрыты особенности многокритериальной оценки эффективности инвестиционных проектов. Проведено сравнение результатов различных модификаций экспертных методов для формирования интегральной оценки эффективности проектов.

### **Ключевые слова:**

инвестиции, проект, экспертные оценки, эффективность инвестиций, портфель проектов.

### **Abstract**

The article reveals the features of a multi-criteria evaluation of the effectiveness of investment projects. The results of various modifications of expert methods used to form an integral assessment of the effectiveness of projects are compared.

### **Keywords:**

investments, project, expert assessments, investment efficiency, project portfolio.

---

Одним из необходимых условий успешной реализации инвестиционного процесса в экономике любой страны является наличие экономических субъектов, способных его обеспечить [1], а также базы предложений для осуществления финансовых потоков с целью получения экономического эффекта. Субъектами инвестиционной деятельности могут выступать государство, отечественные и иностранные юридические и физические лица. Объектами инвестиционной деятельности являются вновь создаваемые и модернизируемые основные фонды, оборотные средства во всех отраслях и сферах народного хозяйства, ценные бумаги, интеллектуальные ценности, научно-техническая продукция, а также имущественные права.

Далее будут изложены несколько подходов к выбору объектов инвестиро-

вания с учетом их географического расположения. Поскольку основным рынком сбыта продукции для Республики Беларусь является Российская Федерация, а также страны, входящие в Единое экономическое пространство, то с точки зрения логистики обоснованно рассмотрение предложений Витебской и Могилевской областей. Кроме того, эти области отстают по показателям инвестиционной деятельности, а создание новых рабочих мест сократит отток рабочей силы за рубеж, в первую очередь в Россию.

С целью привлечения инвесторов и активизации инвестиционной и инновационной деятельности в Республике Беларусь создано Национальное агентство инвестиций и приватизации. На его портале [2] представлена актуальная информация о предлагаемых к

реализации инвестиционных проектах и бизнес-идеях.

В табл. 1 приведены объекты предполагаемого инвестирования,

способствующие развитию приграничных регионов Витебской и Могилёвской областей [2].

Табл. 1. Инвестиционные предложения по Могилёвской и Витебской областям

Название проекта, отрасль, область	Основной потребитель и рынок сбыта
1. Производство транспортерных (конвейерных) лент (химическая и нефтехимическая промышленность, Могилевская область)	Промышленные предприятия горнодобывающей, металлургической, деревообрабатывающей и машиностроительной отраслей стран ЕАЭС
2. Новое производство полуфабрикатов на ОАО «Бобруйский мясокомбинат» (пищевая промышленность, Могилевская область)	Предприятия торговли, учреждения образования, сети быстрого питания, население Республики Беларусь, Российской Федерации
3. Модернизация мельницы, сушилки, линии гранулирования на ОАО «Оршанский комбинат хлебопродуктов» (сельское хозяйство, Витебская область)	Промышленные потребители, бытовое потребление населением, экспорт
4. Строительство цеха убоя и переработки свиней и крупного рогатого скота (пищевая промышленность, Витебская область)	Рынки Республики Беларусь, стран СНГ
5. Строительство цеха родительского стада для производства цыплят яйценоских пород (сельское хозяйство, Витебская область)	Страны Евразийского экономического союза, в том числе внутренний рынок
6. Свиноводческий комплекс на 16000 голов (сельское хозяйство, Витебская область)	ООО «Мясокомбинат Славянский»
7. Переработка изношенных шин (зеленая экономика, Витебская область)	Дорожные службы, жилищно-коммунальные службы, строительные организации, предприятия промышленности
8. Строительство свинарника (сельское хозяйство, Витебская область)	Население, мясокомбинаты
9. Строительство цеха по производству сухих молочных продуктов (пищевая промышленность, Витебская область)	Страны ЕАЭС, ЕС, прочие
10. Создание линии по производству синтепона на базе Богусhevского КУПБО «Престиж» (легкая промышленность, Витебская область)	Швейное производство
11. Строительство мусороперерабатывающего комплекса (зеленая экономика, Витебская область)	Покупатели вторичного сырья на внутреннем рынке
12. Производство современного металлорежущего и вспомогательного инструмента (машиностроение и металлообработка, Витебская область)	Предприятия отраслей машиностроения, автомобильного и железнодорожного транспорта, энергетического и агропромышленного комплекса Республики Беларусь, Российской Федерации и СНГ

Выбранные проекты относятся к приоритетным направлениям государственной инновационной политики Республики Беларусь на 2016–2020 гг. [3].

Проекты оцениваются по различным критериям, среди которых наиболее важными для инвестора можно назвать следующие:

– форма участия. Рассматривае-

мые проекты предполагают следующие варианты участия инвестора: создание нового предприятия с участием местного партнера, вхождение в капитал действующего предприятия и кредитное финансирование.

Создание нового предприятия для реализации инвестиционного проекта выступает как один из вариантов целе-

вого долевого финансирования. Применяется при необходимости привлечь партнерский капитал. Одной из форм финансирования в данном случае выступает венчурный капитал.

Вхождение в капитал действующего предприятия может реализовываться дополнительной эмиссией акций или привлечением дополнительных средств учредителей действующего предприятия. Дополнительный выпуск акций используется для реализации крупномасштабных инвестиционных проектов, инвестиционных программ развития, диверсификации инвестиционной деятельности.

Кредитное финансирование позволяет привлечь средства в больших масштабах, но при этом имеют место определённая сложность и длительность процесса открытия кредитной линии. Кроме того, повышается риск неплатежеспособности и банкротства, снижается прибыль из-за выплаты процентов по кредиту, а при неблагоприятном развитии событий высока вероятность утраты части собственности;

– объем инвестиций. Чем больше объём инвестиций, тем более детально должен быть проработан бизнес-план проекта, оценены возможные угрозы и разработаны компенсационные мероприятия. При крупных капиталовложениях инвестор заинтересован в максимальном участии в управлении реализацией проекта;

– вклад инвестора. Чем большая доля проекта должна быть покрыта за счёт средств инвестора, тем более рискованным для него может быть этот проект. Финансовое участие в проекте его инициаторов и разработчиков для инвестора будет означать и разделение рисков. Следовательно, такой проект будет более привлекательный;

– динамический срок окупаемости. Для крупномасштабных проектов, связанных со строительством и модернизацией, нормативным сроком возврата капиталовложений считается период

в 8...10 лет. Чем меньше срок окупаемости инвестиций, тем проект предпочтительней. В портфеле проектов желательны наличие и краткосрочных проектов, и долгосрочных. Тогда доходы, получаемые от краткосрочных проектов, могут направляться на финансирование долгосрочных, благодаря чему снизится потребность в привлечённых источниках финансирования;

– соответствие приоритетным направлениям развития экономики. В этом случае можно надеяться на поддержку государства, что повышает привлекательность проекта;

– наличие местных ресурсов. Наличие местных ресурсов делает проект менее чувствительным к кризисным явлениям в мировой экономике, которые зачастую приводят к удорожанию экспортируемых материальных ресурсов;

– развитость рынка сбыта. Только наличие гарантированного сбыта продукции по запланированным ценам обеспечит окупаемость капиталовложений.

Условия участия инвестора в проектах и их числовые характеристики таких показателей, как общая сумма инвестиций, вклад инвестора и динамический срок окупаемости, приведены в описании инвестиционных предложений на портале агентства [2].

Оценка проектов на предмет их соответствия приоритетным направлениям развития экономики будет проведена экспертами на основе их собственного видения содержания проектов. Обеспеченность проектов ресурсами и обоснованность объёмов и рынков сбыта будет оценена по соответствующим разделам бизнес-планов.

Таким образом, имеет место многокритериальная задача оценки объектов инвестирования, и цель исследования – сформировать согласованную комплексную оценку привлекательности инвестиционных проектов, которая призвана упростить принятие решения инвесторами о вы-

боре того или иного проекта.

Для определения значимости критериев использован метод анализа иерархий, предложенный в конце 70-х гг. прошлого столетия американским ученым-математиком Т. Саати. Суть метода состоит в возможности построить рейтинг имеющихся у лица, принимающего решения, альтернатив путем сравнения их по различным критериям на основании мнения нескольких экспертов в конкретной предметной области. Первый этап процесса сравнения заключается в построении матрицы парных сравнений критериев с использованием 9-балльной шкалы относительной важности, где 1 означает равнозначность двух критериев, а 9 – очень сильное превосходство одного критерия над другим. Элементы матрицы удовлетворяют следующему соотношению:

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}.$$

Ранжирование (упорядочение альтернатив в порядке предпочтения) с использованием матрицы парных сравнений осуществляется на основании главных собственных векторов этой матрицы. Поскольку процесс их нахождения требует владения определенным математическим аппаратом, чаще всего применяется приближенный метод получения собственных значений и соответствующих им собственных векторов. Так как матрица парных сравнений имеет размерность  $n \times n$  (где  $n$  – количество критериев), то элементы собственного вектора, соответствующего максимальному собственному значению  $\lambda_{\max}$ , могут быть определены по формуле

$$w_i \approx \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}.$$

Далее найденный собственный вектор нормируется таким образом,

чтобы сумма его элементов равнялась единице:

$$w_i^{\text{норм}} = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i}.$$

Полученные координаты нормированного собственного вектора и принимаются в качестве весов каждого из критериев в комплексной оценке совокупности объектов ранжирования.

Для оценки согласованности мнений экспертов принято использовать индекс согласованности (ИС) и отношение согласованности (ОС), которые зависят от числа ранжируемых критериев и могут быть определены следующим образом:

$$ИС = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1);$$

$$ОС = ИС / СС,$$

где  $СС$  – коэффициент случайной согласованности, который может быть найден с помощью табл. 2.

Считается, что мнения экспертов согласуются, если отношение согласованности не более 10 %. В некоторых случаях допустимо значение до 20 %, но не более. Если отношение согласованности выходит из этих пределов, нужно проверить суждения экспертов.

В табл. 3 приведена обобщенная матрица парных сравнений определения значимости критериев экспертами.

С помощью программы MATHCAD были получены собственные значения и собственные векторы матрицы парных сравнений и определено  $\lambda_{\max} = 7,73$ . Мнения экспертов могут считаться согласованными, так как  $ИС = 12,2 \%$ ,  $ОС = 9,2 \%$ .

В табл. 4 приведен расчет весовых коэффициентов критериев с помощью собственного вектора матрицы парных сравнений, соответствующего максимальному собственному значению.

Таким образом, по мнению экс-

пертов, наибольший вес в комплексной оценке проектов имеют объем инвестиций, динамический срок окупаемости, наличие гарантированного сбыта.

Поскольку проекты характеризуются различными критериями, то для унификации их оценки была использована 10-балльная шкала, по которой эксперты оценивали привлекатель-

ность проекта по каждому критерию (10 – проект, наиболее привлекательный для инвестирования; 1 – проект, наименее привлекательный) [4].

Каждый эксперт оценил проекты независимо от других, затем были получены усреднённые и средневзвешенные оценки (табл. 5).

Табл. 2. Случайная согласованность

Размерность матрицы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Согласованность	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Табл. 3. Матрица парных сравнений

Критерий	Форма участия	Объем инвестиций	Вклад инвестора	Динамический срок окупаемости	Соответствие приоритетным направлениям развития экономики	Местные ресурсы	Сбыт
Форма участия	1	3	5	7	9	1/3	1/7
Объем инвестиций	1/3	1	3	5	6	7	3
Вклад инвестора	1/5	1/3	1	3	5	7	1/5
Динамический срок окупаемости	1/7	1/5	1/3	1	3	9	3
Соответствие приоритетным направлениям развития экономики	1/9	1/6	1/5	1/3	1	1/3	1/7
Местные ресурсы	3	1/7	1/7	1/9	3	1	1/5
Сбыт	7	1/3	5	1/3	7	5	1

Табл. 4. Расчёт координат нормированного главного собственного вектора

Критерий	$a_i$	$w_i$
Форма участия	0,0490	0,024
Объем инвестиций	0,5710	0,277
Вклад инвестора	0,2180	0,106
Динамический срок окупаемости	0,6730	0,326
Соответствие приоритетным направлениям развития экономики	0,0650	0,032
Местные ресурсы	0,0890	0,043
Сбыт	0,3990	0,193
Сумма	2,064	1

Табл. 5. Взвешенные экспертные оценки проектов

Проект	Критерий							
	Форма участия	Объем инвестиций	Вклад инвестора	Динамический срок окупаемости	Соответствие приоритетам экономики	Местные ресурсы	Рынок сбыта	Средне-взвешенная оценка
1	4,80	7,20	5,60	7,20	5,80	6,60	6,80	6,83
2	4,80	7,80	5,60	8,60	6,60	8,60	5,80	7,37
3	7,60	6,00	6,00	8,00	5,40	8,80	7,60	7,10
4	4,80	7,00	6,00	3,40	7,80	9,00	8,80	6,13
5	6,00	6,20	6,60	4,40	7,60	8,80	8,40	6,23
6	7,00	6,00	5,60	8,60	8,40	8,80	8,60	7,53
7	6,80	8,60	7,60	9,20	9,20	9,60	8,80	8,75
8	7,40	6,80	5,60	8,42	7,80	8,80	8,80	7,72
9	6,40	8,20	4,60	3,00	8,20	8,40	8,20	6,09
10	5,80	7,40	6,60	7,40	5,40	7,20	6,40	7,01
11	7,40	7,80	8,40	8,40	9,20	9,00	8,60	8,27
12	6,20	7,60	4,80	7,20	6,00	4,50	4,60	6,38
Вес	0,024	0,277	0,106	0,326	0,032	0,043	0,193	1,000

Ранжирование проектов по всем имеющимся критериям с учетом их весов может осуществляться различными способами. Один из них – вычисление площади, ограниченной лепестковой диаграммой. Для этого для каждого проекта строится многоугольник конкурентных преимуществ, у которого на  $i$ -й оси откладываются значения  $i$ -го критерия, умноженного на соответствующий вес. Число осей равно числу критериев. Далее вычисляются площади каждого многоугольника  $S_j$ , величина которых и принимается в качестве комплексной оценки проекта:

$$S_j = \sum_{P_i, P_{i+1}} \frac{1}{2} \cdot p_i \cdot p_{i+1} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{n}\right),$$

где  $p_i, p_{i+1}$  – взвешенные значения соседних в многоугольнике критериев для каждого проекта.

Проектам присваивается ранг, соответствующий номеру в общем списке, упорядоченном по убыванию. Для удобства визуального восприятия различий строят радар. Нанесение на график всех

проектов приведёт к загромождению рисунка и сделает его плохо читаемым, поэтому для примера на рис. 1 представлены многоугольники для проектов с максимальной, средней и минимальной комплексной оценкой (площадью) с учетом критериев, дающих наибольший вклад в общую оценку.

Риск портфеля определяется как вариация баллов, выставяемых экспертами. Для каждого проекта и по портфелю в целом были рассчитаны статистические характеристики, приведённые в табл. 6. Условная эффективность каждого проекта определялась как среднее значение экспертных оценок по данному проекту. Параметр совокупной эффективности представляет собой мультипликативную свертку вариации и условной эффективности. Проекты упорядочены по мере убывания их совокупной эффективности.

В завершении анализа было осуществлено ранжирование проектов по различным методикам расчёта комплексной оценки. Результаты представлены в табл. 7.



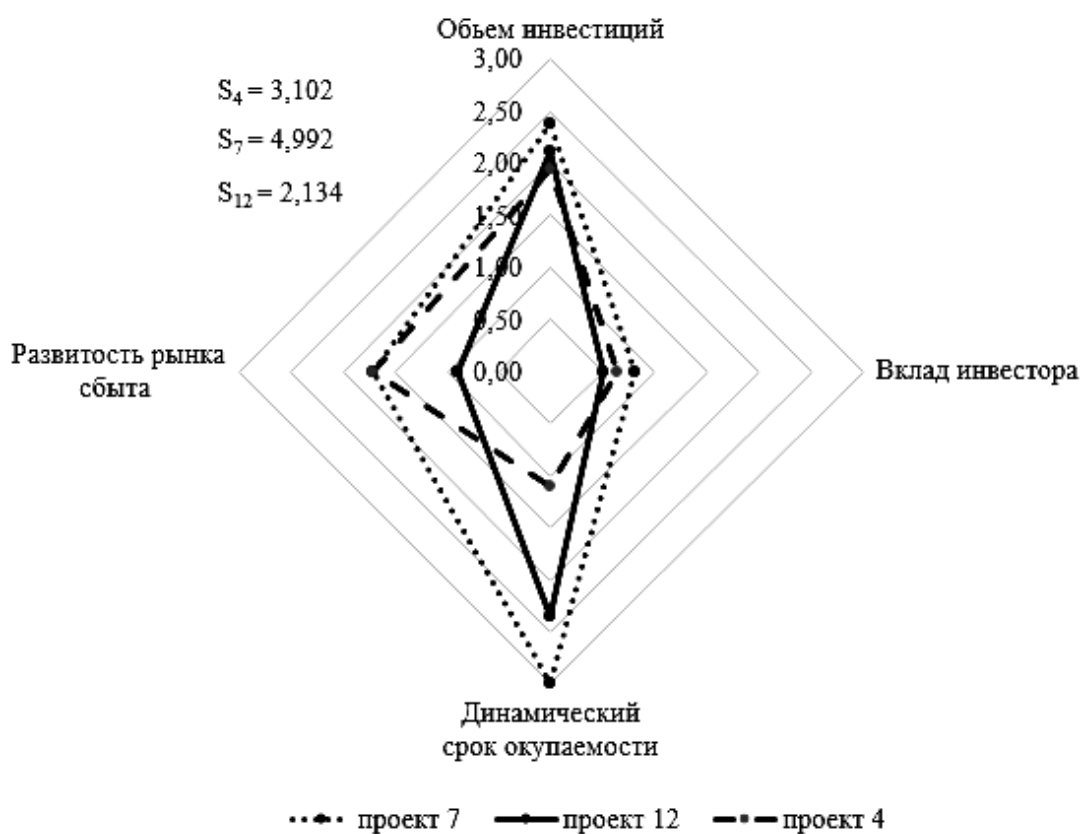


Рис. 1. Многоугольник конкурентных преимуществ проектов

Табл. 6. Статистические характеристики проектов

Проект	Условная эффективность	Риски (дисперсия)	Риски (вариация)	Совокупная эффективность
1	6,83	1,15	0,17	5,21
2	7,37	2,38	0,23	5,29
3	7,10	1,82	0,19	5,71
4	6,13	4,22	0,31	4,63
5	6,23	2,36	0,22	5,32
6	7,53	2,08	0,19	6,13
7	8,75	1,26	0,13	7,42
8	7,72	1,50	0,16	6,43
9	6,09	4,33	0,31	4,63
10	7,01	0,95	0,15	5,62
11	8,27	0,69	0,10	7,48
12	6,38	1,77	0,23	4,53

Табл. 7. Статистические характеристики проектов

Проект	Условная эффективность		Совокупная эффективность		Площадь многоугольника	
	Значение	Ранг	Значение	Ранг	Значение	Ранг
1	6,83	8	5,21	9	2,907	10
2	7,37	5	5,29	8	2,898	11
3	7,10	6	5,71	5	3,424	5
4	6,13	11	4,63	11	3,102	7
5	6,23	10	5,32	7	3,145	6
6	7,53	4	6,13	4	3,939	4
7	8,75	1	7,42	2	4,922	1
8	7,72	3	6,43	3	4,115	3
9	6,09	12	4,63	10	2,912	9
10	7,01	7	5,62	6	3,011	8
11	8,27	2	7,48	1	4,650	2
12	6,38	9	4,53	12	2,134	12

Для статистического обоснования отсутствия значимых различий в оценке проектов по разным методикам были рассчитаны парные коэффициенты корреляции Спирмена  $\rho$  по формуле

$$\rho = 1 - 6 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n \cdot (n - 1)},$$

где  $d_i$  – разность рангов у проекта, по-

лученных по двум различным методикам;  $n$  – число проектов.

Корреляционная матрица, составленная из этих коэффициентов, представлена на рис. 2.

Связь между оценками, полученными по разным методикам, может считаться достоверной с вероятностью более чем 0,95.

комплексная оценка	Коэффициент корреляции рангов Спирмена (Spreadsheet1) Маркированные цветом коэффициенты значимы при $p < ,05000$		
	условная эффективность	Совокупная эффективность	площадь многоугольника
условная эффективность	1,000000	0,874126	0,678322
Совокупная эффективность	0,874126	1,000000	0,881119
Площадь многоугольника	0,678322	0,881119	1,000000

Рис. 2. Матрица коэффициентов корреляции рангов Спирмена

Таким образом, в ходе проведённой работы была сформирована согласованная комплексная оценка привлека-

тельности инвестиционных проектов, которая призвана упростить принятие решения инвесторами о выборе того

или иного проекта. С другой стороны, независимая оценка укажет авторам инвестиционных идей на слабые места проекта, которые им стоит более детально и качественно проработать. Так, в частности, для проекта под номером 9 (строительство цеха по производству сухих молочных продуктов) вызывает вопросы срок его окупаемости. Для повышения привлекательности данного проекта для инвестора инициаторам проекта следует пересмотреть затратную и доходную составляющие, а также использовать реалистичные ставки дисконтирования.

В рассматриваемом случае анализ и ранжирование инвестиционных проектов были проведены с точки зрения классического инвестора, единственной целью которого является вложение средств в независимый инвестиционный проект для получения от него отдачи в разумные сроки и с невысоким уровнем риска.

Однако в действительности спектр интересов инвестора может быть

намного шире, чем просто приумножение своего капитала. Так, инвестор может быть заинтересован в:

– получении возможностей управления и контроля над объектом собственных инвестиций;

– приобретении новых технологий, выходе на новые рынки сбыта продукции, расширении бизнеса и увеличении его стоимости;

– диверсификации собственного портфеля проектов.

Кроме целей капиталовложений, следует учитывать и психологические особенности инвестора, его склонность к риску. Всё это в конечном счёте будет влиять на значимость того или иного параметра проекта и на его оценку инвестором. Таким образом, можно создать модель формирования интегральной оценки инвестиционных проектов в зависимости от предрасположенности инвестора к риску и целей инвестиций.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инвестиции : учебное пособие / Г. П. Подшиваленко [и др.]. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : КНОРУС, 2006. – 200 с.
2. База инвестиционных предложений [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://investinbelarus.by>. – Дата доступа: 19.02.2018.
3. О Государственной программе инновационного развития Республики Беларусь на 2016–2020 годы [Электронный ресурс] : Указ Президента Респ. Беларусь № 31 от 31 янв. 2017 г. – Режим доступа: <http://www.pravo.by>. – Дата доступа: 19.02.2018.
4. Туккель, И. Л. Управление инновационными проектами : учебник / И. Л. Туккель, А. В. Сурина, Н. Б. Кульгин ; под ред. И. Л. Туккеля. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2011. – 416 с.
5. Лобанова, Т. М. Многокритериальная модель формирования оптимального портфеля инвестиционных проектов / Т. М. Лобанова, Д. В. Морозова, Т. Н. Иванькова / V Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Брянск, 31 окт. 2018 г. – Брянск : БГТУ, 2018. – С. 369–376.
6. Ливинская, В. А. Использование функции желательности Харрингтона для оценки регионов с позиции привлекательности / В. А. Ливинская, С. Л. Комарова // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2018. – № 2 (59). – С. 55–64.

*Статья сдана в редакцию 20 декабря 2018 года*

**Татьяна Мизайловна Лобанова**, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет. E-mail: [yatm@rambler.ru](mailto:yatm@rambler.ru).

**Виктория Александровна Ливинская**, канд. физ.-мат. наук, доц., Белорусско-Российский университет. E-mail: [viktoriajlivinskaya@mail.ru](mailto:viktoriajlivinskaya@mail.ru).

**Tatiana Mikhailovna Lobanova**, senior lecturer, Belarusian-Russian University. E-mail: [yatm@rambler.ru](mailto:yatm@rambler.ru).

**Viktoriya Aleksandrovna Livinskaya**, PhD (Physics & Mathematics), Associate Prof., Belarusian-Russian University. E-mail: [viktoriajlivinskaya@mail.ru](mailto:viktoriajlivinskaya@mail.ru).

# **ВЕСТНИК БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**№ 1(62) 2019**

Ответственный за выпуск

И. В. Брискина

Оформление обложки

Е. С. Лустенкова

Дизайн и компьютерная верстка

Н. П. Полевничая

Адрес редакции: пр-т Мира, 43, Белорусско-Российский университет, корп. 1, комн. 331, 212000, г. Могилев. Телефон: 23-00-07, e-mail: [bru@bru.mogilev.by](mailto:bru@bru.mogilev.by).

Журнал «Вестник Белорусско-Российского университета» зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь. Свидетельство о государственной регистрации средства массовой информации № 1240 от 08.02.2010.

Подписано в печать 10.01.2019. Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура Таймс. Усл.-печ. л. 14,32. Уч.-изд. л. 6,67. Тираж 100 экз. Заказ 1730.

Отпечатано в унитарном полиграфическом коммунальном предприятии «Могилевская областная укрупненная типография имени Спиридона Соболя». ЛП 02330/23 от 30.12.2013. Ул. Первомайская, 70, 212030, г. Могилев.