

# ВЕСЦІ

## НАЦЫЯНАЛЬНАЯ АКАДЭМІЯ НАВУК БЕЛАРУСІ

---

СЕРЫЯ ФІЗІКА-ТЭХНІЧНЫХ НАВУК. 2016. № 4

---

# ИЗВЕСТИЯ

## НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

---

СЕРИЯ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК. 2016. № 4

---

Журнал издается с января 1956 г.

Выходит четыре раза в год

Учредитель – Национальная академия наук Беларуси

Журнал зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь,  
свидетельство о регистрации № 391 от 18 мая 2009 г.

*Входит в Перечень научных изданий Республики Беларусь  
для опубликования результатов диссертационных исследований, включен в базу данных  
Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).*

### Редакционная коллегия:

**Витязь П. А.**, академик, доктор технических наук, профессор (главный редактор)  
**Ласковнёв А. П.**, академик, доктор технических наук, профессор (заместитель главного редактора)  
**Алексеева Н. А.**, ведущий редактор журнала

**Белый А. В.**, член-корреспондент, доктор технических наук, профессор  
**Залеский В. Г.**, доктор физико-математических наук  
**Ильющенко А. Ф.**, член-корреспондент, доктор технических наук, профессор  
**Красневский Л. Г.**, член-корреспондент, доктор технических наук, профессор  
**Марукович Е. И.**, академик, доктор технических наук, профессор  
**Мышкин Н. К.**, академик, доктор технических наук, профессор  
**Пенязьков О. Г.**, академик, доктор физико-математических наук  
**Плескачевский Ю. М.**, член-корреспондент, доктор технических наук, профессор  
**Федосюк В. М.**, член-корреспондент, доктор физико-математических наук  
**Хейфец М. Л.**, доктор технических наук, профессор  
**Чижик С. А.**, академик, доктор технических наук, профессор

## Редакционный совет:

- Воденичаров С.**, академик Болгарской академии наук, доктор технических наук, профессор (Республика Болгария)  
**Гавлик Ю.**, доктор технических наук, профессор (Республика Польша)  
**Гордиенко А. И.**, академик, доктор технических наук (Республика Беларусь)  
**Жинтялис Г.**, академик Литовской академии наук, доктор технических наук, профессор (Республика Литва)  
**Каталинич Б.**, доктор технических наук, профессор (Республика Австрия)  
**Клубович В. В.**, академик, доктор технических наук, профессор (Республика Беларусь)  
**Михалевич А. А.**, академик, доктор технических наук, профессор (Республика Беларусь)  
**Наумовец А. Г.**, академик Национальной академии наук Украины,  
доктор физико-математических наук, профессор (Украина)  
**Солнцев К. А.**, академик Российской академии наук, доктор химических наук, профессор (Российская Федерация)  
**Танович Л.**, доктор технических наук, профессор (Республика Сербия)  
**Хрусталёв Б. М.**, академик, доктор технических наук, профессор (Республика Беларусь)

*Адрес редакции:*

*ул. Академическая, 1, к. 119, 220072, г. Минск, Беларусь.  
Тел.: + 375 17 284-19-19; e-mail: fvesti@mail.ru  
vestift.belnauka.by*

---

ИЗВЕСТИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ.

Серия физико-технических наук. 2016. № 4.

*Выходит на русском, белорусском и английском языках*

---

Редактор *Н. А. Алексеева*

Компьютерная вёрстка *Н. И. Кашуба*

Подписано в печать 23.12.2016. Выход в свет 28.12.2016. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бумага офсетная.

Печать цифровая. Усл. печ. л. 14,88. Уч.-изд. л. 16,4. Тираж 90 экз. Заказ 250.

Цена номера: индивидуальная подписка – 10,28 руб., ведомственная подписка – 25,21 руб.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Республиканское унитарное предприятие «Издательский дом «Беларуская навука».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/18 от 02.08.2013. ЛП № 02330/455 от 30.12.2013. Ул. Ф. Скорины, 40, 220141, г. Минск, Беларусь

© РУП «Издательский дом «Беларуская навука».

Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. 2016

# PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

---

PHYSICAL-TECHNICAL SERIES. 2016. No. 4

---

The Journal has been published since January 1956

Issued four times a year

Founded by the National Academy of Sciences of Belarus

The Journal was registered on May 18, 2009 by the Ministry of Information of the Republic of Belarus  
in the State Registry of Mass Media, reg. No. 391

*The Journal is included in the List of Journals for Publication of the results of Dissertation Research  
in the Republic of Belarus and in the database of Russian Science Citation Index (RSCI)*

## Editorial board:

**P. A. Vityaz**, Academician, D.Sc. (Engineering), Professor (editor-in-chief)  
**A. P. Laskovnyov**, Academician, D.Sc. (Engineering) (vice editor-in-chief)  
**N. A. Alekseyeva** (lead editor)  
**A. V. Byeli**, Corresponding Member, D.Sc. (Engineering), Professor  
**S. A. Chizhik**, Academician, D.Sc. (Engineering), Professor  
**V. M. Fedosyuk**, Correspondent Member, D.Sc. (Physics and Mathematics)  
**A. F. Ilyuschenko**, Correspondent Member, D.Sc. (Engineering), Professor  
**M. L. Kheiyfets**, D.Sc. (Engineering), Professor  
**L. G. Krasnevski**, Correspondent Member, D.Sc. (Engineering), Professor  
**Ye. I. Marukovich**, Academician, D.Sc. (Engineering), Professor  
**N. K. Myshkin**, Academician, D.Sc. (Engineering), Professor  
**O. G. Penyazkov**, Academician, D.Sc. (Physics and Mathematics)  
**Yu. M. Pleskachevsky**, Correspondent Member, D.Sc. (Engineering), Professor  
**V. G. Zalesky**, D.Sc. (Physics and Mathematics)

## Editorial council:

**J. Gawlik**, D.Sc. (Engineering), Professor (the Republic of Poland)  
**A.I. Gordienko**, Academician, D.Sc. (Engineering) (the Republic of Belarus)  
**B. Katalinic**, Professor of TU Wien, D.Sc. (Engineering), Professor (the Republic of Austria)  
**B.M. Khrustalyov**, Academician, D.Sc. (Engineering), Professor (the Republic of Belarus)  
**V.V. Klubovich**, Academician, D.Sc. (Engineering), Professor (the Republic of Belarus)  
**A.A. Mikhalevich**, Academician, D.Sc. (Engineering), Professor (the Republic of Belarus)  
**A.G. Naumovets**, Academician of the National Academy of Sciences of Ukraine, D.Sc. (Physics and Mathematics),  
Professor (Ukraine)

**K. A. Soltsev**, Academician of Russian academy of sciences, D.Sc. (Chemistry), Professor (Russian Federation)  
**L. Tanovich**, D.Sc. (Engineering), Professor (the Republic of Serbia)  
**S. Vodenicharov**, Academician of Bulgarian academy of sciences, D.Sc. (Engineering),  
Professor (the Republic of Bulgaria)  
**G. Zintelis**, Academician of Lithuanian academy of sciences, D.Sc. (Engineering),  
Professor (the Republic of Lithuania)

*Address of the Editorial Office:*  
*Akademicheskaya str., room 119, 220072, Minsk, Belarus.*  
*Tel.: +375 17 284-19-19; e-mail: fvesti@mail.ru*

---

PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS.

Physical-technical series. 2016. No. 4.

*Printed in Russian, Belarusian and English languages*

---

Editor *N. A. Alekseyeva*  
Computer imposition *N. I. Kashuba*

It was sent of the press 23.12.2016. Appearance 28.12.2016. Format 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Offset paper.  
Digital press. Printed pages 14,88. Publisher's signatures 16,4. Circulation 90 copies. Order 250.  
Number price: individual subscription – 10,28 byn., departmental subscription – 25,21 byn.

Publisher and printing execution:

Republican unitary enterprise "Publishing House "Belaruskaya Navuka".  
Certificate on the state registration of the publisher, manufacturer, distributor of printing editions  
No. 1/18 dated August 2, 2013. License for the press No.02330/455 dated December 30, 2013.  
Address : F. Scorina str., 40, 220141, Minsk, Belarus.

© RUE "Publishing House "Belaruskaya Navuka".  
Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series. 2016

**СОДЕРЖАНИЕ****МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ**

<b>Ильющенко А. Ф., Фомихина И. В., Дечко М. М., Ковалевский В. Н.</b> Деформационное измельчение зерен микроструктуры легированных сталей при нестационарной интенсивной пластической деформации взрывом.....	7
<b>Рудницкий В. А., Крень А. П., Ланцман Г. А.</b> Соотношение динамической и статической твердости металлов .....	16
<b>Вершина Г. А., Реут Л. Е.</b> Анализ деформационного поведения фторопласта-4 в условиях силового воздействия.....	23
<b>Алифанов А. В., Ционенко Д. А., Милюкова А. М., Ционенко Н. М.</b> Магнитострикционный механизм образования мелкодисперсной структуры в стальных изделиях при магнитно-импульсном воздействии .....	31

**МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА**

<b>Акулович Л. М., Миронович А. В., Ворошуха О. Н.</b> Управление обработкой поверхностей деталей машин в процессах магнитно-электрического упрочнения и магнитно-абразивной обработки.....	37
<b>Кончак В. С., Назаренко А. А.</b> Методика подготовки многомассовых компьютерных моделей к верификации .....	49
<b>Дубовик Д. А., Прибыльский В. И.</b> Гидрообъемно-механические трансмиссии мобильных машин. Расчет кинематических и силовых параметров .....	61
<b>Груданов В. Я., Торган А. Б., Ткачева Л. Т.</b> Моделирование и оптимизация процессов формования макронных изделий в каналах матриц ступенчато-переменного сечения .....	73

**ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН**

<b>Малько М. В., Асадчий А. Н., Василевич С. В., Дегтерев Д. В.</b> Исследование кинетики термического разложения пиролизной смолы .....	84
--	----

**РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ**

<b>Солонар А. С., Ярмолик С. Н., Храменков А. С., Михалковский А. А.</b> Особенности использования метода Монте-Карло для аппроксимации статистических распределений результатов нелинейных преобразований в радиолокационных задачах .....	91
---	----

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ**

<b>Чертков В. М., Железняк В. К.</b> Аппаратно-программный комплекс автоматизированного поиска с возможностью идентификации радиоэлектронных средств скрытого съема информации.....	99
<b>Борискевич А. А.</b> Устойчивый метод нормализации отсканированного мобильным устройством изображения штрихкода .....	106
<b>Золотой С. А., Косило А. В., Ставров А. А., Страшко И. Б.</b> Некоторые пути совершенствования Белорусской космической системы дистанционного зондирования Земли.....	113

**ДИАГНОСТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ**

<b>Чурсин А. А., Макаров Ю. Н.</b> Анализ и прогнозирование развития рынка космических услуг.....	121
---	-----

**CONTENTS****MATERIALS ENGINEERING, METALLURGY**

<b>Ilyuschenko A. Ph., Fomikhina I. V., Dechko M. M., Kovalevskij V. N.</b> Deformational grain grinding of alloyed steels microstructure at non-stationary intense plastic deformation by explosion.....	7
<b>Rudnitsky V. A., Kren A. P., Lantsman G. A.</b> Investigation of the ratio between dynamic and static hardness of metals.....	16
<b>Vershina G. A., Reut L. E.</b> Analysis of deformation behaviour of fluoroplastic-4 in the conditions of mechanical affect.....	23
<b>Alifanov A. V., Tsionenko D. A., Miliukova A. M., Tsionenko N. M.</b> A model of small-dispersed structure formation in steel products by magnetic-pulse action due to magnetostriction.....	31

**MECHANICAL ENGINEERING AND MECHANICS**

<b>Akulovich L. M., Miranovich A. V., Voroshuho O. N.</b> Control of machine components surfacing during magnetic-electric hardening and magnetic-abrasive machining.....	37
<b>Konchak V. S., Nazarenko A. A.</b> A method for preparation of multimass computer models for verification procedure.....	49
<b>Dobovik D. A., Prybylski V. I.</b> Hydrostatic-mechanical transmissions of mobile machines. Calculation of kinematic and force parameters.....	61
<b>Grudanov V. Ya., Torhan A. B., Tkachyova L. T.</b> Modelling and optimization of processes of shaping of pastas in channels of matrices of step-variable section.....	73

**POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER**

<b>Malko M. V., Asadchyi A. N., Vasilevich S. V., Degterov D. V.</b> Study of the kinetics of pyrolytic tar thermal decomposition.....	84
--	----

**RADIOELECTRONICS AND INSTRUMENT-MAKING**

<b>Solonar A. S., Yarmolik S. N., Khramenkov A. S., Mikhalkovski A. A.</b> Features of use of Monte-Carlo method for approximation of statistical distributions of results of nonlinear transformations in radar-tracking problems.....	91
---	----

**INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS**

<b>Chertkov V. M., Zheleznyak V. K.</b> A hardware-software system for automated detection with identification of covert radioelectronic mean.....	99
<b>Boriskevich A. A.</b> A robust method for normalization of barcode images scanned with a mobile device.....	106
<b>Zolotoy S. A., Kosilo A. V., Stavrov A. A., Strashko I. B.</b> Some ways of improving of Belarusian space system of Earth remote sensing.....	113

**DIAGNOSTICS AND SAFETY OF TECHNICAL AND ENVIRONMENT SYSTEMS**

<b>Chursin A. A., Makarov Yu. N.</b> Analysis and forecasting of space service market development.....	121
--	-----

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ**  
**MATERIALS ENGINEERING, METALLURGY**

УДК 539.4:669.3

Поступила в редакцию 09.09.2016  
 Received 09.09.2016

**А. Ф. Ильющенко<sup>1</sup>, И. В. Фомихина<sup>1</sup>, М. М. Дечко<sup>2</sup>, В. Н. Ковалевский<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Институт порошковой металлургии НАН Беларуси, Минск, Беларусь,*

<sup>2</sup>*Белорусский аграрный технический университет, Минск, Беларусь,*

<sup>3</sup>*Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь*

**ДЕФОРМАЦИОННОЕ ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ ЗЕРЕН МИКРОСТРУКТУРЫ  
 ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ИНТЕНСИВНОЙ  
 ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ВЗРЫВОМ**

Изучена зависимость размера зерна легированных высокопрочных сталей аустенитного, бейнитного, мартенситно-старееющего классов от температуры и степени деформации при нестационарной интенсивной пластической деформации взрывом. Построена модель, позволяющая рассчитать величину предела диспергирования и учитывающая зависимость коэффициента зернограницной диффузии от степени деформации и температуры. Результаты расчетов по предложенной формуле и их сравнение с экспериментальными данными показывают удовлетворительное совпадение. Отклонение составляет 3–5%. Установлено, что интенсивное измельчение под действием высокоскоростной пластической деформации взрывом высокопрочных сталей происходит при степенях деформации 20–30%. Увеличение степени деформации до 30–40% не приводит к изменению размера зерна. При деформациях более 40–50% накопленная пластическая деформация, вызывающая дополнительный локальный разогрев материала, обуславливает развитие рекристаллизационных процессов, в результате чего размеры зерна увеличиваются. При деформациях выше 50–60% в материалах возможно появление трещин.

*Ключевые слова:* интенсивная пластическая деформация взрывом, температура, измельчение зерна, модель предела диспергирования.

**A. Ph. Ilyushchenko<sup>1</sup>, I. V. Fomikhina<sup>1</sup>, M. M. Dechko<sup>2</sup>, V. N. Kovalevskij<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Powder Metallurgy Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,*

<sup>2</sup>*Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Belarus,*

<sup>3</sup>*Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus*

**DEFORMATIONAL GRAIN GRINDING OF ALLOYED STEELS  
 MICROSTRUCTURE AT NON-STATIONARY INTENSE PLASTIC DEFORMATION BY EXPLOSION**

Dependence of grain size of alloyed high-strength steels of austenitic, bainitic, maraging classes on temperature and degree of deformation at non-stationary intensive plastic deformation by explosion has been studied. A model which enables to calculate dispersing limit value considering dependence of coefficient of grain-boundary diffusion on degree of deformation and temperature is constructed. The results of calculations by the offered formula and their comparing to experimental data show satisfactory coincidence. A rejection is 3–5%. It is set that the intensive growing shallow under the action of high-speed flowage the explosion of alloyed high-strength steels takes place at the degrees of deformation 20–30%. Increase of degree of deformation to 30–40% does not cause the change of size of grain. At deformations more than 40–50% the accumulated flowage causes additional local warming-up of material and development of recrystallizational processes, sizes of grain increase as a result. At deformations higher 50–60% appearances of cracks in materials is possible.

*Keywords:* intensive plastic deformation by explosion, temperature, grain grinding, the model of dispersing limit.

**Введение.** Известно, что в результате интенсивной пластической деформации металлов на уровне их микроструктуры образуется большое количество дефектов дислокационного и дисклинационного типов, приводящих к фрагментации кристаллической структуры. По мере деформирования происходит разориентация возникающих фрагментов, приводящая к измельче-

нию зерен микроструктуры, достигающих некоторого предельного значения  $d_{\min}$ . Величина  $d_{\min}$  зависит от типа структуры, способа деформирования и параметров процесса: скорости, степени и температуры деформации [1, 3].

В ряде работ предпринята попытка построения математических моделей, позволяющих рассчитать теоретическое значение  $d_{\min}$  [1–6]. В [1] изучены математические модели, описывающие зависимость величины предела измельчения зерен от природы материала и температуры интенсивной пластической деформации по технологии равноканального углового прессования. Данный метод реализует схему, при которой деформирование металла протекает в стационарных условиях (с постоянной и относительно невысокой скоростью деформации, при постоянных степени и температуре деформации). В качестве модельных структур рассматриваются гомогенные микроструктуры металлов и сплавов.

Деформационное измельчение зерен описано в [1] на основе двух механизмов фрагментации:

1. Аккомодационное внутризеренное скольжение. Формирующиеся на границах зерен дефекты и, в первую очередь, стыковые дисклинации создают в зернах микроструктуры мощные поля внутренних напряжений  $\sigma_i$ , вызывающие внутризеренное скольжение. Процесс деформации протекает под действием внутренних напряжений и обеспечивает релаксацию запасенной упругой энергии, связанной, главным образом, со стыковыми дисклинациями. При достижении некоторой критической мощности стыковых дисклинаций начинается испускание со стыков оборванных дислокационных стенок, вызывающих фрагментацию зерен.

2. Аккомодация стыковых дисклинаций путем диффузионного массопереноса. Энергия активации зернограницной диффузии в неравновесных границах зерен существенно зависит от избыточного свободного объема, связанного с внесенными в границу дефектами. При высокой плотности дефектов избыточный свободный объем может стать столь значительным, что энергия активации зернограницной диффузии может стать равной энергии активации диффузии в расплаве [5]. При малых размерах фрагментов скорость диффузионной аккомодации стыковых дисклинаций становится такой высокой, что мощность стыковых дисклинаций не может достичь критической величины, необходимой для испускания оборванной дислокационной стенки, т.е. для фрагментации. Вследствие развития диффузионной аккомодации стыковых дисклинаций появляется предел деформационного измельчения зерен, т.е. минимальный размер зерна, который не может быть уменьшен при заданных условиях пластического деформирования материала.

Основные этапы эволюции структуры, приводящие к образованию мелких зерен, включают в себя [1]: образование скоплений дислокаций; преобразование их в несовершенные границы, обособляющие ячейки – области кристалла с относительно малой плотностью дислокаций; образование полос, которые по мере нарастания деформации уменьшаются в поперечных размерах, изменяют направление развития и пересекаются.

Формирование мелких зерен является результатом многочисленных пересечений предельно тонких полос с большеугловыми границами.

Для расчета минимального размера зерна, достижимого при этих условиях, предложена следующая зависимость:

$$(d^*)^{3,5} \geq \chi \frac{K}{G} \frac{\delta D_b^*}{A_1 \xi \varepsilon_v} \frac{G \Omega}{kT}, \quad (1)$$

где  $\chi = \psi/\varphi$  – геометрический коэффициент, в котором  $\psi$  – коэффициент пропорциональности, связывающий напряжение, вызывающее пластическую деформацию зерен, с пределом текучести материала,  $\varphi$  – геометрический множитель порядка 1;  $K$  – коэффициент Холла–Петча, связывающий предел текучести поликристаллического материала с размером зерна.

В ряде исследований показано, что коэффициент Холла–Петча зависит от различных факторов, сопровождающих процесс деформирования кристаллических структур [1–4]. В [3] приведена формула для расчета коэффициента Холла–Петча для крупнокристаллических металлов:



$$K_0 = \sqrt{\frac{2Gb\sigma^*}{\pi(1-\nu)}}. \quad (2)$$

Здесь  $\sigma^*$  – напряжение в зерне, при котором начинается пластическая деформация. В [3] эта величина приведена для IF-сталей (сталь с микроструктурой без дефектов внедрения) и равна 450 МПа;  $\nu$  – коэффициент Пуассона (для сталей 0,25);  $G$  – модуль сдвига, равный  $8,1 \cdot 10^4$  МПа;  $b$  – вектор Бюргерса, равный  $2,58 \cdot 10^{-10}$  м для ГЦК- и  $2,48 \cdot 10^{-10}$  м для ОЦК-решеток.

Расчет по формуле дает значение коэффициента Холла–Петча для ГЦК ( $8,93 \cdot 10^4$  кг/(с<sup>2</sup>·м<sup>1/2</sup>))- и ОЦК ( $8,76 \cdot 10^4$  кг/с<sup>2</sup>·м<sup>1/2</sup>)-решеток;  $\delta$  – ширина границы, равная удвоенному вектору Бюргерса,  $\delta = 2b = 5,16 \cdot 10^{-10}$  м;  $D_b^*$  – коэффициент зернограницной диффузии, равный  $D_{b0}^* \exp(Q_b^*/kT)$ ;  $Q_b^*$  – энергия активации самодиффузии в равновесных границах зерен;  $\Omega$  – атомный объем, равный  $1,18 \cdot 10^{-23}$  см<sup>3</sup> или  $1,18 \cdot 10^{-29}$  м<sup>3</sup>;  $T$  – температура процесса, К.

В [6] указывается, что энергия активации зернограницной диффузии в неравновесных границах зерен значительно зависит от избыточного свободного объема, связанного с внесенными в границу дефектами. При малой плотности внесенных дефектов наблюдаются обычные значения  $Q_b \sim 9 kT_m$ . При высокой плотности дефектов избыточный свободный объем может стать таким значительным, что величина энергии активации зернограницной диффузии будет равной значению энергии активации диффузии в расплаве  $Q_L \sim 3 kT_m$  [4]. Из этого следует, что данный параметр может быть переменным для различных условий деформирования (температуры и степени деформации).

В [2] приведено значение предэкспоненциального множителя коэффициента зернограницной диффузии ( $D_{b0}^* = 10^{-8}$  м<sup>3</sup>/с) и утверждается, что полученная величина носит оценочный характер. Для точного вычисления величины  $d_{\min}$  необходима подробная информация о значениях  $D_b^*$  и зависимости  $D_b^*(\dot{\epsilon}_v)$ , а также сведения о величине локальной скорости деформации  $\dot{\epsilon}_v$ . Откуда можно предположить, что значение  $D_{b0}^*$  меняется в широких пределах в зависимости от условий деформирования;  $k$  – постоянная Больцмана, равная  $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К;  $A_1$  – численный параметр, равный 10 [1];  $\xi$  – коэффициент однородности пластической деформации, равный  $10^{-4}$  [1].

Цель работы – экспериментальное и теоретическое исследование зависимости размера зерна легированных высокопрочных сталей аустенитного, бейнитного, мартенситно-старяющего классов от температуры и степени деформации при нестационарной интенсивной пластической деформации взрывом и построение модели, позволяющей рассчитывать величину предела диспергирования.

**Результаты и их обсуждение. Модель диспергирования.** В ее основе лежат теория неравновесных границ зерен [3, 4] и результаты экспериментальных и теоретических исследований структуры и свойств легированных сталей, подвергнутых интенсивной пластической деформации [5–9].

Процесс деформирования при обработке легированных сталей взрывом радикально отличается от стационарного процесса. Силовое воздействие на деформируемую заготовку реализуется в результате кратковременного и интенсивного силового импульса. Протекающие при этом процессы принципиально отличаются от стационарных. На макроуровне деформирование происходит с нарастающей скоростью. Значительная часть механической энергии переходит в тепло. Температура обработанной заготовки увеличивается на несколько десятков градусов. На микроуровне локальные разогревы могут быть более значительными. Вследствие динамических силовых воздействий возможна неоднородность упругой и пластической деформаций. Микроструктура легированных сталей представляет собой сложную гетерогенную смесь зерен различных фазового и химического составов.

Немонотонный характер деформирования металлов при обработке взрывом позволяет предположить, что в уравнении параметры  $D_{b0}^*$  и  $D_b^*$ , связанные с зернограницной диффузией, зависят от степени деформации, т. е. они будут рассматриваться как функции степени деформации  $\epsilon$ . Физические механизмы, определяющие эти функции, изучены недостаточно. Поэтому будем исходить из некоторых эмпирических предположений.

Поскольку в нашем эксперименте изменялась не скорость, а степень деформации, то были предприняты попытки связать ее со структурой материала. Предположили, что при деформации

взрывом скорость деформации непостоянна, потому что она происходит под действием ударной волны (вызвана кратковременным воздействием большой силы). Следовательно, скорость деформации увеличивается во времени. Таким образом, чем больше степень деформации, тем выше ее скорость по окончании процесса. Исходя из этого приняли, что средняя скорость деформации пропорциональна степени деформации  $\dot{\epsilon}_v = c\dot{\epsilon}$ , а константа скорости  $c$  равна скорости звука в металле (скорость ударной волны взрыва)  $6 \cdot 10^3$  м/с.

В [2] утверждается, что для точного вычисления величины  $d_{\min}$  необходимы подробные сведения о значениях  $D_b^*$  и зависимости  $D_b(\dot{\epsilon}_v)$ , а также о величине локальной скорости деформации  $\dot{\epsilon}_v$ . Можно предположить, что значение  $D_{b0}^*$  меняется в широких пределах в зависимости от условий деформирования.

На основе кинематического уравнения фрагментации [9] в [3] выведена зависимость оценки накопленной тензорной плотности дислокаций от степени деформации, которая представлена экспоненциальной формулой вида  $\beta_0 \exp(-\beta_1 \epsilon) + \beta_2$ . Указано, что численные оценки качественно совпадают с экспериментальными данными. Поэтому допустим, что зависимость коэффициента зернограничной диффузии от степени деформации может принимать вид

$$D_{b0}(\epsilon) = \beta_0[\beta_1 \exp(-\beta_2) + 1]. \quad (3)$$

Как отмечено в [6], по мере накопления дефектов кристаллической структуры  $Q_b^*$  может меняться от  $Q_b^* \sim 9kT_m$  до  $Q_L^* \sim 3kT_m$ , т. е. убывать. Для простоты примем, что в зависимости от степени деформации и связанного с ней накопления дефектов это убывание линейно:

$$Q_b(\epsilon) = \beta_3 - \beta_4 \epsilon, \quad (4)$$

где  $\beta, \beta_1, \dots, \beta_5$  – некоторые коэффициенты, которые могут быть подобраны эмпирическим путем на основе экспериментальных данных.

Исходя из вышесказанного, с учетом зависимости коэффициента зернограничной диффузии  $D_b$  от степени деформации  $\dot{\epsilon}_v$  и температуры формула (1) примет вид

$$d_{\min}(\epsilon) = \left( \chi k \frac{\delta D_{b0}(\epsilon) \exp\left(-Q_b(\epsilon) \frac{T_m}{T}\right) \frac{\Omega}{kT}}{A_1 \xi c \epsilon} \right)^{\frac{1}{3,5}}. \quad (5)$$

**Экспериментальные данные.** Воздействие высокоскоростной деформации ( $\epsilon = 30$ –75%) на стали аустенитного класса исследовали на склонной к упрочнению при деформации экономно-легированной никелем стали 10X12Г4Н4ЮМ, имеющей однофазную структуру аустенита. Поскольку структура стали в исходном состоянии представляет собой аустенит, упрочнение взрывом проводили без нагрева при 290 К. Результаты эксперимента приведены в табл. 1, фотографии микроструктур – на рисунке *a, б, в*.

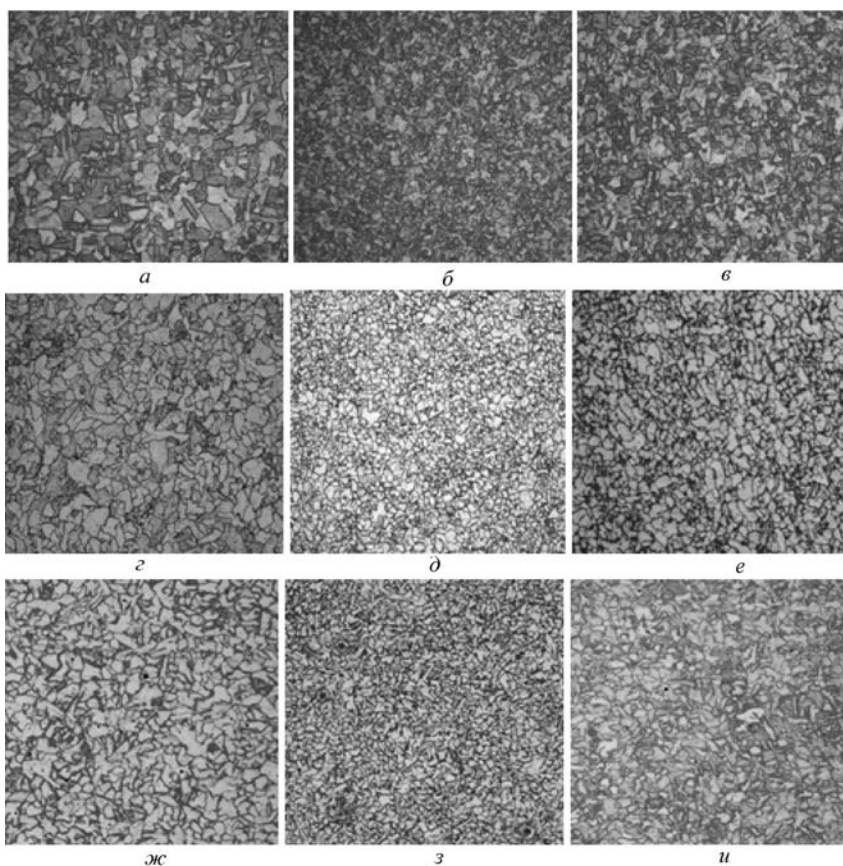
Определено, что интенсивное измельчение стали 10X12Г14Н4ЮМ под действием высокоскоростной пластической деформации взрывом происходит при степенях деформаций в диапазоне 20–40% и составляет в среднем 2–6 мкм относительно исходного зерна в 16–18 мкм. Затем процесс измельчения приостанавливается и при деформациях более 40–50% зерно незначительно увеличивается в размерах до 3–5 мкм. При степенях деформации более 50% происходит разрушение материала. Предел диспергирования стали 10X12Г14Н4ЮМ соответствует степени деформации порядка 30%.

Для стали бейнитного класса 38ХНЗМФА подобное экспериментальное исследование выполнено при трех различных температурах (290, 670, 1120 К), при которых сталь имеет структуру бейнита ( $\alpha'$ -фаза) с ОЦК-решеткой (290, 670 К) и аустенита ( $\gamma$ -фаза) с ГЦК-решеткой (1120 К) (табл. 2, рисунок *г, д, е*).

Установлено, что эффект измельчения при деформировании стали 38ХНЗМФА при 1120 К проявляется сильнее, чем при 290 и 670К. Зависимость размера зерна от степени деформации при данных температурах имеет аналогичный характер: измельчение до степеней деформации

Таблица 1. Экспериментальные данные зависимости размера зерна от степени деформации при 290К для стали аустенитного класса 10X12Г14Н4ЮМ

Степень деформации $\bar{\varepsilon}$	Участок измерения	Размер зерна, мкм	Степень деформации $\bar{\varepsilon}$	Участок измерения	Размер зерна, мкм
Без деформации (исходное состояние)	1	18,6	0,49	1	3,5
	2	17,1		2	2,2
	3	15,8		3	1,8
	4	16,3		4	3,0
	5	14,5		5	1,5
		Средний 16,5			Средний 2,4
0,03	1	16,8	0,58	1	2,6
	2	14,5		2	1,0
	3	14,0		3	2,2
	4	13,8		4	1,2
	5	15,0		5	2,0
		Средний 14,8			Средний 1,8
0,19	1	8,3	0,70	1	3,3
	2	9,6		2	1,9
	3	7,8		3	1,5
	4	8,5		4	2,2
	5	9,2		5	2,1
		Средний 8,7			Средний 2,2
0,31	1	6,9	0,75	1	3,5
	2	5,0		2	2,8
	3	4,5		3	2,1
	4	4,1		4	1,9
	5	5,0		5	1,7
		Средний 5,1			Средний 2,4



Микроструктуры сталей 10X12Г14Н4ЮМ (*a*, *б*, *в* – температура деформирования 290 К), 38ХН3МФА (*z*, *д*, *e* – температура деформирования 1120 К), 03Н18К9М5ТЮ (*жс*, *з*, *u* – температура деформирования 1120 К) в зависимости от степени деформации: *a*, *б*, *в* –  $\varepsilon = 5\text{--}10\%$ ,  $30\text{--}40\%$ ,  $50\text{--}60\%$  соответственно; *z*, *жс* –  $\varepsilon = 3\text{--}5\%$ , *б*, *з* –  $\varepsilon = 20\text{--}30\%$ ; *e*, *u* –  $\varepsilon = 40\text{--}50\%$ ;  $\times 1000$

Т а б л и ц а 2. Экспериментальные данные зависимости размера зерна от степени деформации при 290, 670, 1120 К для стали бейнитного класса 38ХНЗМФА

Степень деформации $\bar{\epsilon}$	Участок измерения	Размер зерна стали 38ХНЗМФА, мкм		
		290 К	670 К	1120 К
Без деформации (исходное состояние)	1	19,5	20,1	20,0
	2	15,9	18,3	19,5
	3	17,0	16,7	18,7
	4	18,3	19,0	17,9
	5	15,6	16,5	19,8
		Средний 17,3	Средний 18,1	Средний 19,2
0,01	1	16,8	10,9	11,9
	2	17,0	13,7	7,5
	3	14,6	11,0	7,0
	4	13,9	14,3	8,6
	5	15,0	12,8	9,4
		Средний 15,5	Средний 12,5	Средний 8,9
0,05	1	13,7	6,7	3,5
	2	10,8	8,3	4,7
	3	9,5	10,2	5,4
	4	12,4	9,4	7,9
	5	10,7	11,0	6,7
		Средний 11,4	Средний 9,1	Средний 5,6
0,19	1	9,3	5,8	1,9
	2	7,4	6,3	3,7
	3	5,8	4,6	2,2
	4	6,9	3,2	3,3
	5	8,5	4,7	2,9
		Средний 7,6	Средний 4,9	Средний 2,8
0,25	1	7,9	2,2	3,5
	2	6,4	4,7	3,2
	3	5,8	4,0	1,4
	4	7,0	3,5	1,3
	5	6,5	5,1	2,0
		Средний 6,7	Средний 3,9	Средний 2,3
0,37	1	7,1	3,8	3,0
	2	8,9	2,6	1,9
	3	6,8	4,9	1,8
	4	7,6	4,3	2,5
	5	7,9	2,1	1,4
		Средний 7,7	Средний 3,5	Средний 2,1
0,45	1	9,1	4,6	2,9
	2	8,6	3,8	1,8
	3	7,7	4,5	2,6
	4	6,9	2,9	3,0
	5	7,3	3,3	2,3
		Средний 7,9	Средний 3,8	Средний 2,5

20–30%, отсутствие изменения размера при 30–40% и последующий рост зерна при степени деформации выше 40–50%.

Для стали мартенситно-старееющего класса 03Н18К9М5ТЮ представлены экспериментальные данные зависимости размера зерна от степени деформации при температурах 290 К – мартенсит ( $\alpha'$ -фаза) с ОЦК-решеткой и 1120 К – аустенит ( $\gamma$ -фаза) с ГЦК-решеткой (табл. 3, рисунок ж, з, и).

Исследовано, что эффект измельчения при деформировании мартенситно-старееющей стали 03Н18К9М5ТЮ в аустенитном состоянии при 1120 К проявляется сильнее, чем при 290 К. Измельчение происходит до степеней деформации 20–40% с последующим ростом зерна при степени деформации выше 40–50%. Увеличение степеней деформации более 50% вызывает разрушение материала. Предел диспергирования стали 03Н18К9М5ТЮ достигается при степенях деформации 20–30%.

Таблица 3. Экспериментальные данные зависимости размера зерна от степени деформации при 290, 1120 К для стали мартенситно-старяющего класса 03Н18К9М5ТЮ

Степень деформации $\bar{\epsilon}$	Участок измерения	Размер зерна стали 03Н18К9М5ТЮ, мкм	
		290 К	1120 К
Без деформации (исходное состояние)	1	19,7	21,0
	2	20,8	16,3
	3	17,9	17,9
	4	21,5	18,7
	5	18,9	19,5
		Средний 19,8	Средний 18,7
0,10	1	11,8	4,9
	2	13,6	6,7
	3	12,9	8,2
	4	15,5	6,0
	5	13,0	6,7
		Средний 13,4	Средний 6,5
0,20	1	11,4	2,6
	2	8,8	5,1
	3	10,3	4,3
	4	8,1	3,7
	5	12,0	3,9
		Средний 10,1	Средний 3,9
0,30	1	7,7	4,9
	2	9,0	2,0
	3	10,3	2,8
	4	7,8	2,5
	5	9,5	3,4
		Средний 8,9	Средний 3,1
0,40	1	8,4	1,8
	2	7,3	3,5
	3	10,1	4,2
	4	8,5	2,7
	5	9,7	2,3
		Средний 8,8	Средний 2,9
0,50	1	7,1	2,1
	2	9,5	4,2
	3	10,4	3,3
	4	11,2	3,6
	5	8,0	5,0
		Средний 9,2	Средний 3,6
0,60	1	8,7	3,9
	2	9,0	4,3
	3	9,8	2,6
	4	12,6	5,5
	5	11,7	5,7
		Средний 10,4	Средний 4,4

Анализ экспериментальных данных зависимости размера зерна от степени деформации (табл. 1–3) показывает, что интенсивное измельчение высокопрочных сталей под действием высокоскоростной пластической деформации взрывом происходит при степенях деформации 20–30%. Затем существует диапазон деформаций 30–40%, в котором изменения размера зерна не происходит. При деформациях более 40–50% накопленная пластическая деформация, вызывающая дополнительный локальный разогрев материала, приводит к развитию рекристаллизационных процессов, в результате размеры зерна увеличиваются. При деформациях выше 50–60% в материалах возможно появление трещин.

**Сопоставление с экспериментом.** Сравнение результатов расчетов по формуле (1) с экспериментальными данными показывает удовлетворительное совпадение (отклонение не более 5%) при степенях деформации до 20–30%. Однако при использовании данной модели диспергирования при дефор-

маціях вышэ 30% расходжэнне становіцца значыльным (больш 15%), не ўлічваецца фізіка працэса нестационарнай інтэнсіўнай пластычнай дэфармацыі матэрыяла взрывом.

Вядзенне поправачных каэфіцыентаў, улічваючых залежнасць каэфіцыента зерногранічнай дыфузіі  $D_b$  ад ступені дэфармацыі  $\epsilon_v$  і тэмпературы (5), дазваляе атрымаць сапаставімыя вынікі. Адрозненне ад эксперыментальных даных складае 3–5%. У табл. 4 прыведзены значэнні ўсіх параметраў, уваходзячых у ўраўненне (5). Расчэты выкананы ў праграме Mathcad.

Т а б л и ц а 4. Значэнні параметраў, іспользаваных пры расчэтах залежнасці памера зэрна ад ўмоў дэфармавання

Марка сталі	$T_{\text{деф}}$ , К	Структура	Вектор Бюргера $b$ , м	Предэкспоненціальны множытель каэфіцыента зерногранічнай дыфузіі, м <sup>3</sup> /с			Энергія актывацыі зерногранічнай дыфузіі $Q_b$	
				$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$
10X12Г14Н4ЮМ	290	$\gamma$ -фаза ГЦК	$2,58 \times 10^{-10}$	$2 \times 10^6$	$2 \times 10^4$	-16	6	-1,4
38ХНЗМФА	290	$\alpha'$ -фаза ОЦК	$2,48 \times 10^{-10}$	$4 \times 10^5$	40	-9	4,5	-1,6
	670	$\alpha'$ -фаза ОЦК	$2,48 \times 10^{-10}$	$10^3$	15	-15	7,7	-1,4
	1120	$\gamma$ -фаза, ГЦК	$2,58 \times 10^{-10}$	1	15	-15	9	-1
03Н18К9М5ТЮ	290	$\alpha'$ -фаза ОЦК	$2,48 \times 10^{-10}$	$2 \times 10^6$	20	-10	4,4	-1
	1120	$\gamma$ -фаза, ГЦК	$2,58 \times 10^{-10}$	$2 \times 10^5$	53	-20	18	-5,8

П р и м е ч а н и е.  $G$  – модуль сдвига –  $8,5 \cdot 10^4$  МПа;  $\nu$  – каэфіцыент Пуассона – 0,25;  $\sigma_{\text{т.зэрна}}$  – прэдел тэкучасці зэрна – 450 МПа;  $k$  – пастаянная Больцмана –  $1,381 \cdot 10^{-23}$  кг·м<sup>2</sup>/(с<sup>2</sup>·К);  $\Omega$  – атамны аб'ём –  $1,18 \cdot 10^{-29}$  м<sup>3</sup>;  $\chi$  – геаметрычны каэфіцыент – 1;  $A$  – лічэбны параметр – 10;  $\xi$  – каэфіцыент аднароднасці пластычнай дэфармацыі –  $10^{-4}$ ;  $c$  – каэфіцыент залежнасці скорасці дэфармацыі ад ступені дэфармацыі –  $6 \cdot 10^3$  м/с;  $T_m$  – тэмпература плаўлення для сталі 10X12Г14Н4ЮМ – 1683 К, для сталей 38ХНЗМФА і 03Н18К9М5ТЮ – 1810 К.

**Заклученне.** Проведены эксперыментальнае і тэарэтычнае даследаванне залежнасці памера зэрна легіраваных высокапрочных сталей аустенітнага, бейнітнага, мартенсітна-стараючага класоў ад тэмпературы і ступені дэфармацыі пры нестационарнай інтэнсіўнай пластычнай дэфармацыі взрывом.

Построена мадэль, дазваляючая расчэтываць велічыню прэдела дыспергіравання, улічваючы залежнасць каэфіцыента зерногранічнай дыфузіі  $D_b$  ад ступені дэфармацыі  $\epsilon_v$  і тэмпературы.

Расчэты і графікі выкананы з іспользаваннем праграмы Mathcad. Атрыманы сапаставімыя з эксперыментальнымі значэннямі даных. Адрозненне складае 3–5%.

#### Спісок іспользаваных істочнікаў

1. Прэдел дыспергіравання пры РКУ-дэфармацыі. Вліянне тэмпературы / В.Н. Чувільдеев [і др.] // Докл. РАН. – 2004. – Т. 396, № 3. – С. 332–338.
2. Чувільдеев, В. Н. Прэдел ізмельчэння зэрнаў пры РКУ-дэфармацыі / В. Н. Чувільдеев, В. И. Копылов // Металлы. – 2004. – №1. – С. 22–35.
3. Утяшев, Ф. З. Дэфармацыйныя метады атрыmania наноструктуріраваных матэрыялаў і магчымасці іх іспользавання ў авіядвигатэлях / Ф. З. Утяшев // Авіацыйна-касмічная тэхніка і тэхналогія. – 2009. – № 10 (67). – С. 7–11.
4. Соотнашеніе Холла–Петча в нано- і мікросталічных металлах, атрыманых метадамі інтэнсіўнага пластычнага дэфармавання / А. В. Нохрін [і др.] // Фізіка граніц зэрнаў в металлах, сплавах і кераміках // Вестнік Ніжэгородскага ўніверсітэта ім. Н.И. Лобачевскага. – 2010. – № 5(2). – С. 142–146.
5. Чувільдеев, В. Н. Нераўнаважныя граніцы зэрнаў в металлах. Тэорыя і прыложэння / В. Н. Чувільдеев. – М.: Фізматліт, 2004. – 304 с.
6. Чувільдеев, В. Н. Мікромеханізм дэфармацыйна-стимуліраванай зерногранічнай самодыфузіі / В. Н. Чувільдеев // Фізіка металлаў і металлеведзене. – 1996. – Т. 81, № 5. – С. 5–13.
7. Нохрін, А. В. Эксперыментальныя і тэарэтычныя даследаванні эвалюцыі структуры субмікросталічных металлаў, атрыманых метадамі інтэнсіўнага пластычнага дэфармавання: дыс. ... д-ра фіз.-мат. навук: 01.04.07 / А. В. Нохрін. – Н. Новгород, 2014. – 320 л.
8. Kaibyshev, O. A. Superplasticity: Microstructural Refinement and Superplastic Roll Forming / O. A. Kaibyshev, F. Z. Utyashev // Futurepast. Arlington, VA22201 USA. – 2005. – P. 386.
9. Утяшев, Ф. З. Савременныя метады інтэнсіўнай пластычнай дэфармацыі / Ф. З. Утяшев. – Уфа: УГАТУ, 2008. – 313 с.

## References

1. Chuvil'deev, V. N., Kopylov, V. I., Nokhrin, A. V., Makarov, I. M. and Lopatin, Yu. G. (2004), "Limit of dispersing at ECA-deformation. Influence of temperature", *Doklady Akademii Nauk* [Paper of RAN], vol. 396, no. 3, pp. 332–338.
2. Chuvil'deyev, V. N. and Kopylov, V. I. (2004), "Limit of grains crumbling at ECA-deformation", *Metally* [Metals], no. 1, pp. 22–35.
3. Utyashev F. Z. (2009), "Deformation methods of nanostructured materials production and possibilities of their utilization in air jet motors building", *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya* [Aviation and space technics and technologie], no. 10 (67), pp. 7–11.
4. Nokhrin, A. V., Chuvil'deyev, V. N., Kopylov, V. I., Lopatin, Yu. G., Pirozhnikova, O. E., Sakharov, N. V., Piskunov, A. V. and Kozlova, N. A. (2010), "Correlation Hall – Petch in nano- and microcrystalline metals, produced by methods of intensive plastic deformation", *Fizika granits zeren v metallakh, splavakh i keramikakh. Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo* [Physics of grains limits in metals, alloys and ceramics. News of Nizny Novgorod University of N. I. Lobachevsky], no. 5(2), pp. 142–146.
5. Chuvil'deyev, V. N. (2004), *Neravnovesnye granitsy zeren v metallakh. Teoriya i prilozheniya* [Non-equilibrium limits of grains in metals. Theory and additions], Physmatlit, Moscow, RU.
6. Chuvil'deyev, V. N. (1996), "Micro mechanism of deformation-stimulated grain- limit self diffusion", *Fizika metallov i metallovedenie* [Physics of metals and metals science], vol. 81, no. 5, pp. 5–13.
7. Nokhrin, A. V. (2014), "Experimental and theoretical investigations of sub-microcrystalline metals evolution produced by method of intensive plastic deformation", D. Sc. Thesis, Condensed Matter Physics, The Federal state autonomous educational institution of higher education "Nizhny Novgorod State University. Lobachevskii", N. Novgorod, RU.
8. Kaibyshev, O. A. and Utyashev, F. Z. (2005), "Superplasticity: Microstructural Refinement and Superplastic Roll Forming", *Futurepast. Arlington, VA22201 USA*, p. 386.
9. Utyashev, F. Z. (2008), *Sovremennye metody intensivnoi plasticheskoi deformatsii* [Modern methods of intensive plastic deformation], USATU, Ufa, RU.

## Информация об авторах

*Ильющенко Александр Федорович* – член–корреспондент, доктор технических наук, профессор, генеральный директор Государственного научно-производственного объединения порошковой металлургии (220005, г. Минск, ул. Платонова, 41, Беларусь). E-mail: alexil@mail.belpak.by

*Фомихина Ирина Викторовна* – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, зав. лабораторией металлофизики. ГНУ «Институт порошковой металлургии» НАН Беларуси (220005, г. Минск, ул. Платонова, 41, Беларусь). E-mail: iscentr@tut.by или ivfom@tut.by

*Дечко Михаил Михайлович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Основы научных исследований и проектирования». Белорусский аграрный технический университет (220023, г. Минск, пр. Независимости, 99, Беларусь). E-mail: mdechko@rambler.ru

*Ковалевский Виктор Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Порошковая металлургия, композиционные материалы и покрытия». Белорусский национальный технический университет (220013, г. Минск, ул. Я. Коласа, 24, Беларусь). E-mail: vn.kovalevskii@gmail.com

## Для цитирования

Ильющенко, А. Ф. Деформационное измельчение зерен микроструктуры легированных сталей при нестационарной интенсивной пластической деформации взрывом / А. Ф. Ильющенко, И. В. Фомихина, М. М. Дечко, В. Н. Ковалевский // Вес. Нац. акад.наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2016. – № 4. – С. 7–15.

## Information about the authors

*Ilyushchenko Alexandr Fedorovich* – Corresponding member Dr. Sc. (Engineering), Professor, General Director of State Scientific and Production Assotiation of Powder Metallurgy (SSPA PM) of the National Academy of Sciences of Belarus, (41, Platonov str. 220005, Minsk, Belarus). E-mail: alexil@mail.belpak.by

*Fomikhina Irina Victorovna* – Ph. D. (Engineering), Senior Scientific Researcher, Head of metallophysics laboratory of SSI "Powder Metallurgy Institute" of the National Academy of Sciences of Belarus (41, Platonov str. 220005, Minsk, Belarus). E-mail: iscentr@tut.by or ivfom@tut.by

*Dechko Mikhail Mikhailovich* – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor, the Department "Bases of scientific investigations and designing". Belarusian National Technical University (99, Nezavisimosti Ave., 220023, Minsk, Belarus). E-mail: mdechko@rambler.ru

*Kovalevsky Viktor Nikolaevich* – Dr.Sci. (Engineering), Professor of chair "Powder metallurgy, composite materials and coatings". Belarusian National Technical University (24, Ya.Kolas str. 220013, Minsk Belarus). E-mail: vn.kovalevskii@gmail.com

## For citation

Ilyuschenko A. Ph., Fomikhina I. V., Dechko M. M., Kovalevskij V. N. Deformational grain grinding of alloyed steels microstructure at non-stationary intense plastic deformation by explosion. *Proceedings of the National academy of sciences of Belarus, physical-technical series*, 2016, no. 4, pp. 7–15.

**В. А. Рудницкий, А. П. Крень, Г. А. Ланцман**

*Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь*

## СООТНОШЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ И СТАТИЧЕСКОЙ ТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛОВ

Рассматриваются вопросы измерения твердости методом ударного вдавливания индентора. Показано, что превышение динамической твердости над статической может быть описано с помощью коэффициента динамичности, представляющего собой функцию свойств материала и условий испытаний. В рамках дислокационной теории показано влияние скорости деформации на величину твердости, при этом отличие значений коэффициента динамичности объясняется разной кристаллической структурой исследуемых материалов. С помощью прибора ИПМ-1К получены экспериментальные диаграммы динамического нагружения различных металлов: стали, алюминия, бронзы, латуни, меди, титана. Предложена методика калибровки динамических твердомеров для расчета статической твердости по Бринеллю без использования эталонных мер твердости.

*Ключевые слова:* твердость, металлы, индентирование, кристаллическая решетка, динамическоенагружение.

**V. A. Rudnitsky, A. P. Kren, G. A. Lantsman**

*The Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

## INVESTIGATION OF THE RATIO BETWEEN THE DYNAMIC AND STATIC HARDNESS OF METALS

Problems of measurement of hardness by the dynamic indentation method are discussed. It is shown that an excess of dynamic hardness over static one can be described by the coefficient, which is a function of material properties and test conditions. In framework of the dislocation theory the influence of strain rate on hardness value is shown, and the difference in ratio between static and dynamic hardness can be explained by different crystal structure of materials. With the help of the device IPM-1K the experimental diagrams of dynamic loading of various metals: steel, aluminum, bronze, brass, copper, titanium were obtained. A method of calibration of dynamic hardness testers for calculation of the Brinell hardness without using standard hardness test blocks was proposed.

*Keywords:* hardness, metals, indentation, crystal lattice, dynamic loading.

**Введение.** Измерение твердости является одним из самых распространенных видов испытаний, используемых при решении различных практических задач в области материаловедения, трибологии, механики разрушения. Особенно это касается измерения динамической твердости, поскольку определение статической (точнее квазистатической) твердости может быть выполнено только в лабораторных условиях на специально изготовленных образцах-свидетелях, в то время как динамические ударные испытания можно проводить непосредственно на изделиях. Испытания проводятся с помощью широко распространенных ударных твердомеров, осуществляющих деформирование материала посредством жесткого бойка-индентора с энергией, как правило, не превышающей 15 мДж.

В то же время величины статической и динамической твердости могут отличаться по значению, поскольку измерения проходят при различных скоростях вдавливания. Принимая во внимание, что числа статической твердости в шкалах Бринелля, Роквелла, Виккерса являются общепринятыми, приведение результатов динамических измерений к статическим представляет практический интерес. В настоящей работе на основе анализа динамичности нагружения обосновываются теоретические положения, устанавливающие количественную связь между числами динамической и статической твердости. Рассматривается прибор, позволяющий регистрировать процесс ударного вдавливания индентора, и сама диаграмма ударного нагружения в координатах контактное усилие – глубина вдавливания, позволяющая изучить реакцию материала при деформировании.

**Теоретические положения.** В общем случае величина твердости  $H$ , которая с физической точки зрения является мерой сопротивления вдавливанию индентора, представляет собой функ-



цию деформации  $\varepsilon$ , скорости деформации  $\dot{\varepsilon}$  и коэффициента деформационного упрочнения  $n$ . Можно записать следующие выражения для статической  $H_s$  и динамической  $H_d$  твердости:

$$H_s = H_s(\varepsilon_s, n, \dot{\varepsilon}_s), \quad (1)$$

$$H_d = H_d(\varepsilon_d, n, \dot{\varepsilon}_d), \quad (2)$$

В (1), (2) можно получить выражения для деформации и скорости деформации для вдавливания сферического индентора в упругопластическое пространство при использовании формулы Тэйбора [1]:

$$\varepsilon = 0,2 \frac{d}{D}, \quad (3)$$

где  $d$  – диаметр пластического отпечатка в материале;  $D$  – диаметр сферического индентора.

Средняя скорость пластической деформации в этом случае будет равна

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{t_a} = 0,2 \frac{d}{Dt_a}, \quad (4)$$

где  $t_a$  – длительность вдавливания индентора при квазистатических испытаниях или длительность активной стадии удара (стадии нагружения) при динамическом вдавливании.

Обычно значения  $\varepsilon_d$  и  $\varepsilon_s$  при статическом и динамическом нагружениях близки, поскольку должно выполняться условие  $0,24 < d/D < 0,6$ , рекомендованное [2], по выбору нагрузки, обеспечивающей относительную независимость величины измеряемой твердости от глубины вдавливания. Коэффициент деформационного упрочнения  $n$  также имеет одно и то же значение, поскольку идет речь об одном и том же материале. Что же касается скоростей деформации  $\dot{\varepsilon}_s$  и  $\dot{\varepsilon}_d$ , то для них наблюдается существенное различие. Например, принимая  $d/D = 0,4$  и учитывая, что длительность квазистатического вдавливания индентора вместе с выдержкой под нагрузкой составляет в среднем 30 с (при измерении твердости по Бринеллю), скорость деформации  $\dot{\varepsilon}_s$ , согласно формуле (4), будет примерно равна  $2,67 \cdot 10^{-3}$  1/с. При измерении динамической твердости, оставляя  $d/D = 0,4$ , продолжительность  $t_a$  равна 20–50 мкс, что примерно соответствует скорости деформации  $\dot{\varepsilon}_d = 2,28 \cdot 10^3$  1/с. Таким образом, скорость деформации при динамическом вдавливании превышает статическую более чем на 6 порядков.

Если, как было обосновано ранее, принять, что  $\varepsilon_d = \varepsilon_s$ , а  $n = \text{const}$ , то, используя (1), (2), получаем, что  $H_d$  и  $H_s$  связаны между собой коэффициентом

$$H_d(\dot{\varepsilon}_d) = \gamma H_s(\dot{\varepsilon}_s), \quad (5)$$

где  $\gamma$  – коэффициент динамичности.

Из уравнения (5) следует, что величина  $\gamma$  является функцией только скоростей деформации при динамическом и статическом нагружениях, которые в свою очередь зависят от свойств материала (например, вида кристаллической решетки) и условий испытаний (например, температуры, формы индентора). В отличие от низкомолекулярных вязкоупругих материалов, где наблюдается вязкое сопротивление вдавливанию, пропорциональное скорости деформации, в металлах влияние скорости деформации проявляется значительно слабее и физически определяется недостатком времени для установления равновесного состояния материала при пластической деформации [3]. В литературе это явление иногда называют квазивязким сопротивлением [4]. Учет влияния  $\dot{\varepsilon}$  может производиться с помощью степенного закона с малым показателем степени (например, [5]):

$$H_d = H_s \left( \frac{\dot{\varepsilon}_d}{\dot{\varepsilon}_s} \right)^m, \quad (6)$$

где  $\gamma = \left( \frac{\dot{\varepsilon}_d}{\dot{\varepsilon}_s} \right)^m$  – коэффициент динамичности, величина  $m$  составляет порядка 0,1.

В литературе имеются и другие уравнения для оценки  $\gamma$ . В [6] приводится зависимость, полученная на основе анализа многочисленных экспериментов на стальных изделиях, для  $\gamma$  в виде функции предупредной скорости индентора  $v_0$ :

$$\gamma = \frac{1}{2} \left( 1 + \sqrt{1 + \nu_0 \frac{355}{H_s}} \right), \quad (7)$$

где значения твердости  $H_s$  выражаются в виде чисел Бринелля.

В настоящей работе предлагается использовать физически более обоснованную зависимость для определения динамической твердости при условии одинаковых значений деформации:

$$H_d = H_s + Kn \left( \frac{\dot{\epsilon}_d}{\dot{\epsilon}_s} \right). \quad (8)$$

Формула (8) содержит коэффициент  $K$ , имеющий размерность напряжения, который является функцией свойств контролируемого металла [7], а также его кристаллической структуры [4, 8].

Разделив зависимость (8) на  $H_s$ , получим выражение для коэффициента динамичности  $\gamma$ :

$$\gamma = \frac{H_d}{H_s} = 1 + \frac{K}{H_s} \ln \left( \frac{\dot{\epsilon}_d}{\dot{\epsilon}_s} \right), \quad (9)$$

из которого видно, что коэффициент  $\gamma$  всегда больше единицы и уменьшается с ростом  $H_s$ .

Если определение статической твердости стандартизовано и выполняется согласно принятым методикам, то способы выражения динамической твердости могут быть разными: через потери энергии при деформировании, длительность ударного контакта и др. Наиболее оптимально выразить твердость как отношение максимального контактного усилия  $P_{\max}$  к площади проекции пластического отпечатка  $A$  [9]:

$$H_d = \frac{P_{\max}}{A}, \quad (10)$$

где  $A = \pi a^2$ ,  $a$  – радиус отпечатка, который связан с глубиной вдавливания формулой [9] (рис. 1):

$$a = \frac{d}{2} = \sqrt{Dh_c}. \quad (11)$$

Здесь  $D$  – диаметр сферического наконечника индентора;  $h_c$  – контактная глубина вдавливания или расстояние от вершины индентора до плоскости проекции пластического отпечатка [9]:

$$h_c = 0,5(h_{\max} + h_p) \quad (12)$$

( $h_{\max}$  – максимальная глубина вдавливания индентора;  $h_p$  – глубина пластического отпечатка).

С учетом формул (11) и (12) выражение (10) для динамической твердости следующее:

$$H_d = \frac{2P_{\max}}{\pi D(h_{\max} + h_p)}. \quad (13)$$

Формулы (1)–(13) представляют собой теоретическую основу исследования и для их подтверждения необходимы экспериментальные данные.

**Экспериментальное оборудование.** Для проведения экспериментов использовался прибор типа ИПМ-1К, разработанный в Институте прикладной физики НАН Беларуси и внесенный в Госреестр средств измерений № РБ 03 03 4258 15.

Схема работы прибора показана на рис. 2. При падении индентора во время контакта с испытуемым материалом в катушке индуктивности наводится ЭДС, пропорциональная скорости перемещения индентора, измерение

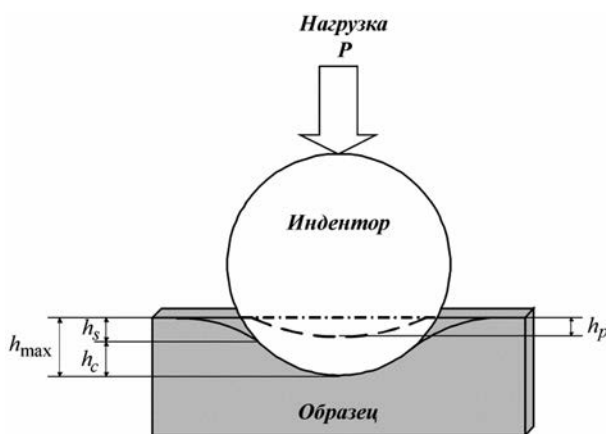


Рис. 1. Схема контакта индентора с материалом

которой с последующим интегрированием или дифференцированием позволяет получить значения перемещения или контактного усилия соответственно. Индентор датчика прибора изготовлен из карбида вольфрама, модуль упругости которого равен 710 ГПа, а твердость составляет свыше 1600 НВ. Масса индентора  $m = 4,3$  г, диаметр сферического наконечника  $D = 2,3$  мм, предупредительная скорость индентора составляла около 0,84 м/с.

Типичная диаграмма вдавливания, полученная на экспериментальной установке и используемая для определения параметров, входящих в расчетные формулы, представлена на рис. 3.

По диаграмме контактного взаимодействия можно четко определить значения максимального контактного усилия и перемещения, глубину пластического отпечатка и рассчитать другие величины, необходимые для определения динамической твердости.

**Результаты эксперимента.** Исследования проводились на образцах из металлических материалов, имеющих различную твердость: углеродистая сталь, медь, алюминий, латунь, бронза, титан. Характерные параметры индентирования, получаемые при их испытании, приведены в таблице.

По данным таблицы можно оценить диапазон изменения  $\ln(\dot{\epsilon}_d / \dot{\epsilon}_s)$ , который является довольно узким и находится в пределах 12,55–13,52. Исходя из данных таблицы, среднее значение равно 12,9. В таблице также приведена расчетная величина коэффициента  $\gamma$ . Среднее значение коэффициента  $K$  для сталей, рассчитанное по формуле (8), можно принять равным 49,3 МПа. Применительно к сталям наибольшие значения  $\gamma$ , как видно из таблицы, соответствуют малоуглеродистым сталям, прошедшим отпуск, а наименьшие значения – углеродистым закаленным и легированным сталям. Подставляя в формулу (9) значения  $\ln\left(\frac{\dot{\epsilon}_d}{\dot{\epsilon}_s}\right) = 12,9$  и учитывая принятую для стали величину  $K = 49,3$  МПа, можно оценить реальный диапазон изменения динамического коэффициента  $\gamma$  с помощью следующего выражения:

$$\gamma = 1 + \frac{49,3}{H_s} 12,9 = 1 + \frac{636}{H_s}. \quad (14)$$

При испытании стали, имеющей статическую твердость 1000 МПа ( $\approx 102$  НВ), получим  $\gamma = 1,62$ , а для высокоуглеродистой стали после термообработки с твердостью 6000 МПа –  $\gamma = 1,06$ .

Выражение (14) характеризуется высокой стабильностью, что подтверждает теоретическую возможность определения  $H_s$  по данным  $H_d$  для сталей вне зависимости от их фазового состава

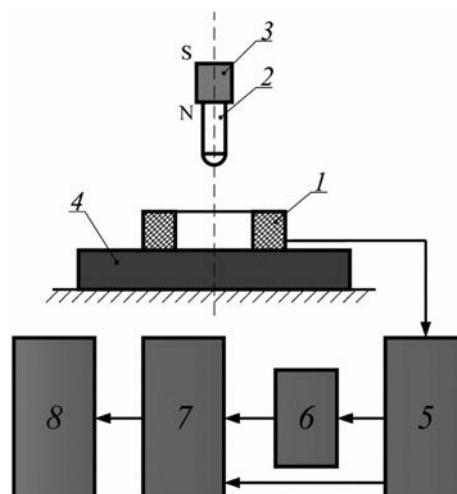


Рис. 2. Схема экспериментальной установки динамического индентирования для определения твердости металлов: 1 – катушка индуктивности; 2 – индентор; 3 – постоянный магнит; 4 – образец; 5 – предварительный усилитель; 6 – блок синхронизации; 7 – аналого-цифровой преобразователь; 8 – устройство вывода информации

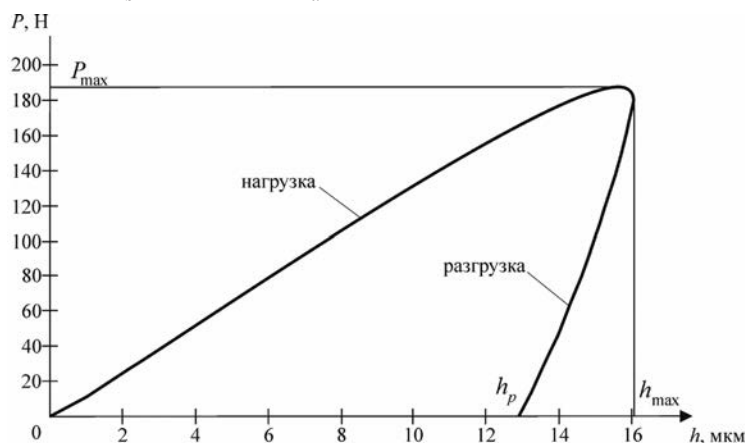


Рис. 3. Типичная зависимость изменения нагрузки от глубины индентирования

## Сравнительные характеристики, получаемые при деформировании металлов

Материал	НВ, МПа	$H_s$ , МПа	$\dot{\epsilon}_s$	$\dot{\epsilon}_d$	$\ln\left(\frac{\dot{\epsilon}_d}{\dot{\epsilon}_s}\right)$	$H_d$ , МПа	$\gamma = \frac{H_d}{H_s}$	$K$ (8)	$K$ (15)
Алюминий	64	628	0,0027	845	12,64	663	1,06	2,78	2,71
	68	667	0,0026	852	12,69	698	1,05	2,44	
	145	1422	0,0034	957	12,55	1470	1,03	3,79	
Бронза	80	785	0,0027	925	12,76	940	1,20	12,16	14,06
Латунь	103	1010	0,0023	958	12,92	1230	1,22	17,00	
	108	1059	0,0023	965	12,95	1320	1,25	20,12	
	135	1324	0,0021	981	13,07	1480	1,12	11,91	
	96	942	0,0024	953	12,88	1110	1,18	13,06	
	158	1550	0,0032	1010	12,65	1800	1,16	19,76	
Медь	48	471	0,003	847	12,55	630	1,34	12,68	
	69	677	0,0028	922	12,69	890	1,31	16,79	
Титан	192	1884	0,0029	1040	12,78	2490	1,32	47,46	50,73
Сталь	106	1040	0,0023	1080	13,06	1690	1,63	49,78	
	107	1050	0,0023	1080	13,06	1690	1,61	49,02	
	143	1403	0,0031	1120	12,81	2100	1,50	54,44	
	270	2649	0,0025	1160	13,05	3320	1,25	51,45	
	438	4297	0,002	1185	13,30	4960	1,15	49,87	
703	6896	0,0016	1170	13,52	7450	1,08	40,95		

и вида термообработки. Оно служит основой для использования динамических твердомеров, которые в настоящее время калибруются по эталонным мерам твердости.

В нашем случае первичной информацией о твердости является динамическая твердость, а конечным результатом – статическая твердость, поэтому преобразуем формулу (9), выразив  $H_s$  через  $H_d$ :

$$\gamma = \frac{H_d}{H_d - K \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}_d}{\dot{\epsilon}_s}\right)}. \quad (15)$$

На рис. 4 приведены экспериментальные зависимости динамического коэффициента  $\gamma$  от динамических чисел твердости  $H_d$  для стали, латуни, меди и алюминия, имеющих различную величину предварительного термического или деформационного упрочнения. Показано значение  $\gamma$  для образца из титана, которое по величине достаточно близко к значениям  $\gamma$  для сталей. Для описания зависимости  $\gamma = f(H_d)$  использовалось значение логарифма  $\ln\left(\frac{\dot{\epsilon}_d}{\dot{\epsilon}_s}\right) = 12,9$ , а коэффициент  $K$ , полученный при аппроксимации, имел различные значения: 50,73 МПа для стали; 14,06 МПа для латуни, меди; 2,71 МПа для алюминия (таблица) и по величине был близок к значениям, полученным по формуле (8).

Из рис. 4 можно сделать следующие выводы. Динамический коэффициент  $\gamma$  **растет с уменьшением** статической твердости, что объясняется увеличением величины пластической деформации, повышающей сопротивление динамическому вдавливаю индентора, и приближается к единице при высокой твердости. Единой зависимости динамического коэффициента  $\gamma$  для всех металлов не существует, а имеется семейство кривых  $\gamma = \gamma(H_d)$ , описываемых уравнением (15), с различными коэффициентами  $K$ . В области низких значений чисел твердости наименьшее отклонение динамической твердости от статической (малое значение  $\gamma$ ) **наблюдается для алюминия**, наибольшее отклонение – для сталей.

Влияние скорости деформации на величину твердости объясняется дислокационной теорией, согласно которой сопротивление сдвигу при пластическом течении определяется действием сил трения перемещения дислокаций по атомным плоскостям скольжения [3]. Различие кривых  $\gamma = \gamma(H_d)$  можно объяснить разной кристаллической структурой металлов [4]. Медь, латунь и алюминий имеют гранцентрированную кубическую решетку, у которой плоскости скольжения имеют более плотную упаковку атомов по сравнению со сталью, имеющей объемно центрированную кубическую решетку, чем и объясняется высокая пластичность этих металлов. Образец из титана имеет гексаго-

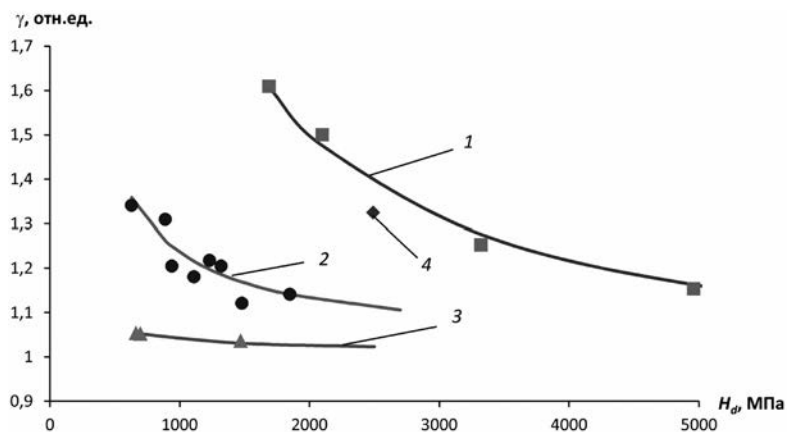


Рис. 4. Зависимость динамического коэффициента  $\gamma$  от значений динамической твердости для стали (1), меди, бронзы и латуни (2), алюминия (3), точка (4) соответствует образцу из титана; сплошными линиями показаны аппроксимирующие зависимости, соответствующие формуле (15) для указанных материалов

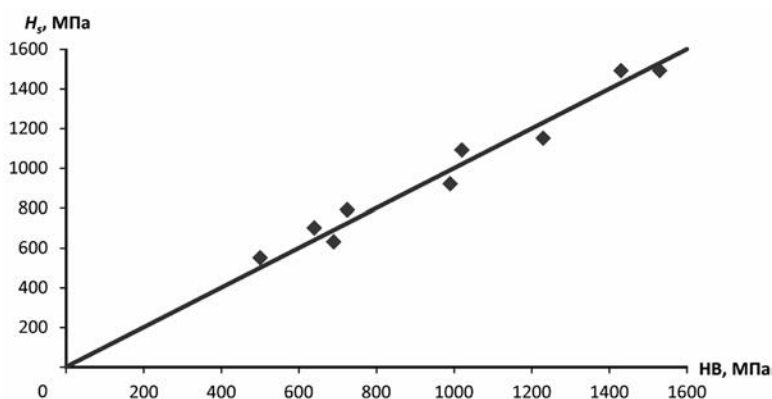


Рис. 5. Соответствие статической твердости  $H_s$ , полученной по результатам динамических испытаний, и статической твердости HB

нальную плотноупакованную решетку, механизм пластической деформации которого в виде двойникования значительно отличается от скольжения, наблюдаемого в кубических решетках.

Для оценки достоверности полученных выражений были выполнены следующие эксперименты. На образцах из стали, латуни, меди и алюминия, не использовавшихся в предыдущих исследованиях, вначале с помощью установки динамического индентирования в соответствии с формулой (13) определялась динамическая твердость как среднее из трех измерений. После чего, учитывая группу металлических материалов (сталь, латунь, медь, алюминий), для каждого значения твердости с помощью зависимостей рис. 4 определяли коэффициент динамичности  $\gamma$ . Разделив значения динамической твердости на величину  $\gamma$ , получили статические числа твердости  $H_s$ . На этих же образцах определяли статическую твердость с помощью прибора Бринелля. Сопоставление измеренных значений статической твердости HB (переведенных в мегапаскалы), полученных на приборе Бринелля, и твердости  $H_s$ , рассчитанной по данным динамических испытаний, показано на рис. 5.

Как следует из рис. 5, между значениями твердости наблюдается хорошее соответствие, позволяющее использовать ее динамические измерения для получения общепринятых статических чисел твердости без применения операции тарировки динамических твердомеров на эталонных мерах. Расчеты показывают, что погрешность измерения не превышает 8%, при этом отклонение измеренных значений не превышает 10 ед. Бринелля во всем рассматриваемом диапазоне.

**Заключение.** На основании известных литературных данных и собственных результатов экспериментальных исследований предложена методика перевода динамических чисел твердости в общепринятые статические числа с использованием коэффициента динамичности, который является функцией отношения скоростей деформаций, твердости и свойств материала, определяемых видом кристаллической решетки. Приводятся уравнения для коэффициента дина-

мичности для стали, латуни, меди, бронзы и алюминия, экспериментальная проверка которых подтвердила возможность использования приборов динамического индентирования без потери точности для оценки свойств металлов в статических числах твердости. Приведена схема прибора, реализующего метод динамического индентирования, разработанного в Институте прикладной физики НАН Беларуси, позволяющего получать непрерывную диаграмму вдавливания сферического индентора. Характерные параметры данной диаграммы (максимальная контактная сила, глубина упругого и пластического вдавливания) являются достаточными для расчета твердости металлов.

#### Список использованных источников

1. Tabor, D. *The Hardness of Metals* / D. Tabor. – London: Oxford University Press, 1951. – 173 p.
2. ISO 6506-1:2014 "Metallic materials – Brinell hardness test – Part 1: Test method".
3. Степанов, Г. В. Поведение конструкционных материалов в упругопластических волнах нагрузки / Г. В. Степанов. – Киев: Наукова думка, 1978. – 111 с.
4. Koeppel, B. J. Dynamic indentation hardness of metals / B. J. Koeppel, G. Subhash // IUTAM Symposium on Micro and Macro structural Aspects of Thermoplasticity / The series Solid Mechanics and its Application. – 2002. – Vol. 62. – P. 447–456.
5. Mroz, Z. Mathematical models of inelastic material behavior / Z. Mroz // Solid Mechanics division. – Waterloo: University of Waterloo Press, 1973. – P. 120–146.
6. Дрозд, М. С. О некоторых факторах, определяющих уровень динамического коэффициента твердости / М. С. Дрозд, Ю. И. Славский // Тр. Волгоградского политехнического института. – 1972. – Вып. 4. – С. 39–55.
7. Степанов, Г. В. Сопротивление металлов динамическому внедрению индентора / Г. В. Степанов, Э. Г. Сафаров // Проблемы прочности. – 1986. – № 5. – С. 80–83.
8. Koeppel, B. J. An experimental technique to investigate the dynamic indentation hardness of materials / B. J. Koeppel, G. Subhash // Experimental Techniques. – 1997. – Vol. 21, N 3. – P. 16–18.
9. Oliver, W. C. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology / W. C. Oliver, G. M. Pharr // J. Mater. Res. – 2004. – Vol. 19, N 1. – P. 4–20.

#### References

1. Tabor, D. (1951), *The Hardness of Metals*, Oxford University Press, London, GB.
2. ISO 6506–1:2014 "Metallic materials – Brinell hardness test – Part 1: Test method".
3. Stepanov, G. V. (1978), *Povedenie konstruktsionnykh materialov v uprugoplasticheskikh volnakh nagruzki* [The behavior of engineering materials under the elastic-plastic stress waves], Naukova dumka, Kiev, UA.
4. Koeppel, B. J. and Subhash, G. (2002), "Dynamic indentation hardness of metals". *IUTAM Symposium on Micro and Macro structural Aspects of Thermoplasticity. The series Solid Mechanics and its Application*, vol. 62, pp. 447–456.
5. Mroz, Z. (1973), "Mathematical models of inelastic material behavior", *Solid Mechanics division*, University of Waterloo Press, Waterloo, BE, pp. 120–146.
6. Drozd, M. S. and Slavskij, Yu. I. (1972), "About some factors determining the level of the dynamic hardness coefficient", *Trudy Volgogradskogo politekhnicheskogo instituta* [Proceedings of the Volgograd Polytechnic Institute], no. 4, pp. 39–55.
7. Stepanov, G. V. (1986), "Resistance of the metal to the dynamic impression of the indenter", *Problemy prochnosti* [Strength Problems], no. 5, pp. 80–83.
8. Koeppel, B. J. and Subhash, G. (1997), "An experimental technique to investigate the dynamic indentation hardness of materials", *Experimental Techniques*, vol. 21, no. 3, pp. 16–18.
9. Oliver, W. C. and Pharr, G. M. (2004), "Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology", *Journal of Materials Research*, 2004, vol. 19, no. 1, pp. 4–20.

#### Информация об авторах

*Рудницкий Валерий Аркадьевич* – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник. Институт прикладной физики НАН Беларуси (220072, г. Минск, ул. Академическая, 16, Беларусь). E-mail: rudnitsky@iaph.bas-net.by

*Крень Александр Петрович* – доктор технических наук, заведующий лабораторией контактно-динамических методов контроля. Институт прикладной физики НАН Беларуси (220072, г. Минск, ул. Академическая, 16, Беларусь). E-mail: alekspk@mail.ru

*Ланцман Герман Аркадьевич* – магистрант. Институт прикладной физики НАН Беларуси (220072, г. Минск, ул. Академическая, 16, Беларусь). E-mail: germanlantsman@gmail.com

#### Для цитирования

Рудницкий, В. А. Соотношение динамической и статической твердости металлов / В. А. Рудницкий, А. П. Крень, Г. А. Ланцман // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2016. – № 4. – С. 16–22.

#### Information about the authors

*Rudnitsky Valery Arkadievich* – D. Sc. (Engineering), Professor. The Institute of Applied Physics of the National Academy of Science of Belarus (16, Akademicheskaya str., 220072, Minsk, Belarus). E-mail: rudnitsky@iaph.bas-net.by

*Kren Alexander Petrovich* – D. Sc. (Engineering), Head of the mechanical testing laboratory. The Institute of Applied Physics of the National academy of science of Belarus (16, Akademicheskaya str., 220072, Minsk, Belarus). E-mail: alekspk@mail.ru

*Lantsman German Arkadevich* – undergraduate. The Institute of Applied Physics of the National academy of sciences of Belarus (16, Akademicheskaya str., 220072, Minsk, Belarus). E-mail: germanlantsman@gmail.com

#### For citation

Rudnitsky V. A., Kren A. P., Lantsman G. A. Investigation of the ratio between the dynamic and static hardness of metals. Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, of physical-technical series. 2016, no. 4, pp. 16–22.

**Г. А. Вершина, Л. Е. Реут**

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь*

## **АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ ФТОРОПЛАСТА-4 В УСЛОВИЯХ СИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

Работа посвящена анализу деформационного поведения фторопласта в условиях нагружения и изучению возможности изготовления фторопластовых изделий методом холодного формоизменения прессованных заготовок без последующих операций нагрева и термофиксации размеров готовой детали. На основании многочисленных исследований, проводимых по изучению полимера в различных лабораториях, авторами предпринята попытка создания механической модели фторопласта и обоснования возможности применения к расчету фторопластовых изделий теоретических методов и подходов, разработанных для низкомолекулярных материалов. Рассматривается технологический процесс изготовления разрезных фторопластовых колец, получаемых путем навивки ленточной заготовки на цилиндрическую оправку, и изучается возможность создания теоретической базы для разработки и расчета инструмента, позволяющего при холодном деформировании получать изделия требуемых размеров и форм. На основании обобщения и анализа результатов исследований относительно строения фторопласта, изменения его структуры при силовом воздействии и характера возникающих деформаций авторами впервые обоснована и доказана возможность принятия для полимера модели твердого кристаллического тела и применения к математическому описанию его деформационного поведения при нагружении подходов и расчетных методик, разработанных в механике твердых деформируемых сред для классических низкомолекулярных материалов.

*Ключевые слова:* фторопласт, структура, деформации при силовом воздействии, рекристаллизация, деформационное поведение, механическая модель материала, механика твердых деформируемых тел, холодное формование изделий.

**G. A. Vershina, L. E. Reut**

*Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus*

## **ANALYSIS OF DEFORMATION BEHAVIOUR OF FLUOROPLASTIC-4 IN THE CONDITIONS OF MECHANICAL AFFECT**

Analysis of deformation behaviour of fluoroplastic-4 in the conditions of mechanical affect. Polymeric materials and, in particular, fluoroplastic-4 and modifications on its basis are widely used in industry. Unique properties of a fluoroplastic make it irreplaceable constructional material and provide a high demand for production of details of different function. The work is devoted to the analysis of deformation behavior of fluoroplastic in the conditions of loading and to studying of possibility of manufacturing of fluoroplastic products by a method of cold forming of the pressed preparations without the subsequent operations of heating and thermofixing of the sizes of a ready detail. On the basis of the numerous researches of the polymer in various laboratories, authors undertake attempt of creation of mechanical model of fluoroplastic and substantiation of possibility of application of theoretical methods and the approaches, developed for low-molecular materials, to calculation of fluoroplastic products. A technological process of manufacturing of cutting fluoroplastic rings obtained by winding a tape preparation on cylindrical pilot is considered, and possibility of creation a theoretical base for design and calculation of a tool allowing cold deformation to obtain a product of demanded shape and size is studied. By results of the analysis it is established, that owing to high crystallinity of fluoroplastic, obtained at polymerization and increasing at recrystallization processes, its structure can be considered as completely crystal, homogeneous and isotropic, corresponding to materials studied in the mechanic of solid deformable bodies. Neglecting to the presence in structure of an insignificant amorphous phase and its influence on the deformation mechanism, mechanical behaviour of fluoroplastic at power influence it is possible to consider as the process including only two deformations – *elastic* (consisting truly elastic and highly-elastic, submitting to certain values to Hooke's law) and *residual*, growing out of structural reorganization of a material. At the same time, exactly recrystallization, leading to occurrence of irreversible deformations, it is necessary to accept as a limit state of a material, and as settlement limit pressure it is necessary to use a limit of recrystallization of a material. On the basis of generalization and analysis of results of researches concerning a structure of fluoroplastic, changes of its structure at power influence and character of arising deformations, authors founded and proved for the first time a possibility of acceptance of the model of solid crystal body for the polymer and application of approaches and settlement techniques developed in the mechanic of solid deformable environments for classical low-molecular materials to the mathematical description of its deformation behavior at loading.

*Keywords:* fluoroplastic, structure, deformations at power influence, recrystallization, deformation behavior, mechanical model of material, mechanics of solid deformable bodies, cold formation of products.

**Введение.** Фторопласт-4 (политетрафторэтилен), известный первоначально под названием «тефлон», открыт в 1938 г. и получил широкое применение в самых различных отраслях промышленности и областях народного хозяйства. Обладая целым рядом уникальных свойств (химическая инертность к любым агрессивным средам, проявляемая до  $+300\text{ }^{\circ}\text{C}$ , самый низкий среди всех полимеров коэффициент трения, высокая термостойкость и отличные диэлектрические и механические свойства, сохраняемые в диапазоне температур от  $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+260\text{ }^{\circ}\text{C}$  [1, 2], а также физиологическая и биологическая безвредность), фторопласт-4 является ценным и незаменимым конструкционным материалом в химической и электротехнической промышленности, в приборостроении, машиностроении, авиации, военной и космической технике, в нефтегазовой отрасли и атомной энергетике, а также в медицине, легкой и пищевой промышленности.

Номенклатура деталей, изготавливаемых из фторопласта-4, весьма разнообразна. В технических конструкциях широко используются его антифрикционные свойства как самого «скользкого» из полимеров, поэтому его применяют в качестве матричной основы или покрытия при производстве подшипников и деталей, подвергающихся интенсивному трению и истиранию (поршневые кольца, манжеты, сальники и т. д.). Из фторопласта-4 изготавливают мембраны, фильтры, трубы, втулки, уплотнительные кольца для фланцевых и резьбовых соединений, элементы запорных и регулирующих клапанов, а также другие детали требуемого назначения. Для изготовления деталей применяют фторопластовые заготовки различной конфигурации (цилиндры, листы, стержни, волокна и др.), которые подвергают соответствующей механической обработке для придания деталям необходимых размеров и форм. Учитывая, что фторопласт-4 ни при каких температурных условиях, даже выше температуры разложения ( $+415\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), не переходит в вязкотекучее состояние, достаточное для горячего прессования или литья под давлением, основными технологическими процессами изготовления фторопластовых изделий являются холодное прессование порошкообразного полимера с последующим спеканием, а затем дальнейшее формоизменение полученной заготовки обработкой резанием (для получения пленок, листов, волокон) или давлением путем создания в заготовке остаточных необратимых деформаций, придающих детали необходимую форму. При этом большинство существующих в настоящее время технологий связано со значительными отходами материала и необходимостью термообработки изделий, что делает процесс их изготовления малопродуктивным и дорогостоящим.

Данная работа посвящена исследованию технологического процесса изготовления разрезных фторопластовых колец (рис. 1), получаемых из ленточной заготовки прямоугольного сечения путем наматывания ленты на цилиндрическую оправку с последующими нагреванием, термофиксацией и разрезкой [3, 4]. Такая технология позволяет значительно снизить отходы производства, а также существенно повысить производительность за счет автоматизации полного цикла изготовления разрезного кольца, однако необходимость обязательной термообработки детали для фиксации ее размеров и формы приводит к дополнительным энергозатратам, требует увеличения времени изготовления и, как следствие, повышает стоимость изделий.

Цель настоящей статьи – анализ механического поведения фторопласта-4 в условиях нагружения и исследование возможности изготовления колец требуемого диаметра методом *холодной навивки* ленточной заготовки на калибр, а затем разрезания полученной спирали на кольца без последующей термофиксации изделий.

**Механическая модель фторопласта-4. Анализ и обоснование выбора.** Деформационное поведение полимеров под нагрузкой обладает целым рядом особенностей и специфических проявлений, зависящих от природы материала, его молекулярного строения и структуры, температуры и скорости нагружения и т. д. Это создает большие трудности при попытках теоретического описания процесса и в силу разнообразности свойств полимеров не позволяет создать единую стройную теорию, охватывающую хотя бы один класс полимерных материалов.

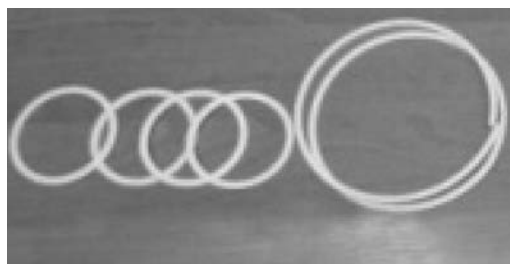


Рис. 1. Уплотнительные фторопластовые кольца

В настоящее время основными данными относительно поведения полимеров под нагрузкой являются ре-



зультаты экспериментальных исследований, а основными расчетными формулами – эмпирические формулы, построенные на этих результатах.

Исследования показывают, что полимеры в зависимости от их структуры и температурного состояния проявляют под нагрузкой самые разнообразные свойства, подобные, например, упругим свойствам газов либо высоковязким жидкостям, либо деформируются так же, как это происходит в твердых деформируемых телах. Возникающие аналогии поведения позволяют для некоторых условий нагружения применять к исследованию процесса деформирования фторопласта-4 теории и расчетные формулы, достаточно полно разработанные для соответствующих материалов, но с адаптацией к специфике полимера.

Для создания механической модели фторопласта-4, определяющей его поведение под нагрузкой, и исследования возможности применения к нему теоретических подходов, разработанных для классических материалов, рассмотрим структуру полимера и произведем схематизацию свойств, позволяющую приблизить его деформационное поведение к указанным материалам.

Полимерные материалы представляют собой высокомолекулярные соединения, состоящие из длинных молекулярных цепей (макромолекул), образованных многократно повторяющимися мономерными звеньями, одинаковыми или разными по химическому составу и строению. Большая длина молекулярных цепей и возможность свободного вращения звеньев вокруг валентных связей обуславливают стремление макромолекул к сворачиванию, поэтому они принимают разнообразные конформации в виде клубков, повторяющихся изгибов, складок, спиралей и т. д., являющиеся термодинамически наиболее устойчивыми. Макромолекулы, имея значительную длину при очень малом поперечном размере, обладают высокой гибкостью, но, соединяясь между собой химическими или координационными связями, они образуют различные конфигурации и структуры, определяющие своеобразие свойств и специфику поведения полимерных материалов. Поэтому в формировании свойств полимеров значение имеет не только *химическая структура*, определяемая видом атомов и способом их соединения в молекулярные цепи, но и *надмолекулярная (физическая) структура*, т. е. способ упаковки макромолекул, размеры и форма полученных конструкций и их взаимное пространственное расположение. Надмолекулярная структура является характерной особенностью полимерных материалов и во многом определяет их технологические и эксплуатационные свойства [5].

Собираясь в конструкции различным образом, макромолекулы могут располагаться хаотически или укладываться упорядоченно, создавая соответственно аморфные (с ближним порядком) или кристаллические (с дальним порядком) структуры. Каждая из них обладает своими свойствами и своим механическим проявлением при температурно-силовых воздействиях.

*Аморфные полимеры* однофазны, однородны и изотропны. В зависимости от температуры они могут находиться в стеклообразном, высокоэластическом и вязкотекучем состояниях, что определяет их деформационное поведение под нагрузкой. Переход из высокоэластического состояния в стеклообразное (и наоборот) происходит при температуре стеклования  $T_{ст}$ , а переход в вязкотекучее состояние – при температуре текучести  $T_T$ . Температуры переходов не являются точными константами материала, а представляют собой некоторый температурный интервал. Аморфное строение имеют полимеры с разветвленной цепью или с нерегулярным строением (оргстекло, полистирол и др.), а также полимеры при температурах выше температуры плавления кристаллитов  $T_{пл}$ , когда кристаллографическая решетка разрушена за счет теплового движения молекул.

*Кристаллические полимеры* в основе своей структуры имеют участки с высокоупорядоченным расположением макромолекул, уложенных параллельно друг другу и образующих кристаллические конструкции со всеми характерными для кристаллов признаками. Эти участки обладают локальной анизотропией, но в силу их разнонаправленности материал в целом остается изотропным. Создание идеальной структуры с высокой степенью упорядоченности по всему объему кинетически затруднено, поэтому наряду с равновесными кристаллическими структурами возникают аморфные участки с хаотичным расположением молекул. Вследствие этого кристаллические полимеры всегда двухфазны и включают в себя кристаллические и аморфные области. Однако эти фазы неотделимы друг от друга, поскольку образованы одними и теми же макромолекулами, входящими одновременно в кристаллическую и аморфную области и пронизывающи-

ми структуру, связывая воедино все вещество. Поэтому строение кристаллических полимеров можно рассматривать как сложное сочетание аморфных и кристаллических участков различной степени упорядоченности. Количественное соотношение между этими фазами определяет степень кристалличности полимера [6]. Кристаллические полимеры характеризуются двумя температурными значениями – температурой стеклования  $T_{ст}$  (аморфная фаза) и температурой плавления  $T_{пл}$  (кристаллическая фаза).

Фторопласт-4 представляет собой *кристаллический полимер*, состоящий из кристаллических областей с упорядоченными участками правильных, параллельно уложенных, зигзагообразных спиральных цепей и аморфной фазы, заполняющей пространство между кристаллитами (рис. 2). Линейное строение молекул и отсутствие между ними поперечных связей обеспечивают высокую плотность их укладки и создание в полимере кристаллической фазы, практически заполняющей весь его объем [7]. Степень кристалличности фторопласта-4, полученная при полимеризации, очень высока и при плотности 2,2–2,3 г/см<sup>3</sup> составляет порядка 80–95%.

Кристаллическая фаза существенно влияет на механические свойства полимера и при высоком ее содержании его деформационное поведение в значительной степени определяется поведением кристаллической части структуры [8, 9].

Высокая степень кристалличности фторопласта-4 придает ему твердость, прочность и жесткость, что при указанных свойствах делает его механическое поведение подобным поведению классических твердых материалов. Поэтому, пренебрегая особенностями молекулярного строения, а также наличием и влиянием эластичной аморфной фазы, структуру фторопласта-4 с достаточно точным приближением можно рассматривать как *полностью кристаллическую, идеально сплошную, однородную и изотропную*, соответствующую материалам, изучаемым в *механике твердых деформируемых тел*.

С целью исследования возможности применения к расчету фторопласта-4 методов и подходов, принятых для этих материалов, рассмотрим изменения, возникающие в его структуре при температурно-силовых воздействиях (в частности, при холодном деформировании), и примем модель его механического поведения, способную быть описанной в рамках существующих теорий.

Известно, что всякое силовое воздействие сопровождается деформацией тела и конечный результат изменения размеров и формы детали зависит от схемы нагружения, величины нагрузки и физико-механических свойств материала. Существующие в настоящее время теории, описывающие деформационное поведение твердых тел (теории упругости, пластичности, разрушения и др.), наиболее полно разработаны для низкомолекулярных кристаллических материалов, для которых характерны только упругие и пластические деформации, протекающие по известным механизмам. Эти теории достаточно достоверны, проверены экспериментально и успешно используются в практике инженерных расчетов. Однако поведение полимеров принципиально отличается от поведения указанных твердых тел и деформации, возникающие в них под действием силового поля, имеют другую природу, величину, механизм развития.

При деформировании фторопласта-4 его полная деформация до момента разрушения складывается из *упругой, высокоэластической и остаточной деформаций*, каждая из которых отличается по величине, характеру проявления и имеет свой преимущественный температурный диапазон возникновения [10]:

$$\varepsilon_{\text{полн}} = \varepsilon_{\text{упр}} + \varepsilon_{\text{в.э}} + \varepsilon_{\text{ост}} \quad (1)$$

*Упругая* деформация во фторопласте-4 имеет такую же природу, как в любом твердом теле: связана с изменением межцентровых, межатомных расстояний и валентных углов, незначительная по величине, подчиняется закону Гука и, возникнув в начальный момент нагружения, сохраняется на протяжении всего процесса деформирования, вплоть до разгрузки или разрушения материала. Упругая деформация обратима и имеет мгновенный характер: со скоростью звука достигает своего зна-



Рис. 2. Структура фторопласта

чения и мгновенно исчезает после разгрузки, поэтому ее называют *мгновенной деформацией*. Она не зависит от температуры и при любых температурах нагружения является сопутствующей деформацией, однако при  $T < T_{ст}$  ( $T_{ст} = -120\text{ °C}$ ), когда аморфная фаза затвердевает, она становится преобладающей и единственной. Материал в таком состоянии представляет собой монолитное упруготвердое вещество, в котором вследствие низкой подвижности и гибкости макромолекул любое силовое воздействие способно привести лишь к незначительным деформациям. При таких температурах фторопласт-4 ведет себя как жесткий линейно-упругий материал, подчиняющийся законам механики твердого тела, однако, несмотря на высокую степень кристалличности, его деформационное поведение при этих температурах практически полностью определяется свойствами затвердевшей аморфной фазы и незначительно зависит от кристаллической фазы [7]. С понижением температуры и особенно при достижении температуры хрупкости  $T_{хр}$  многие полимеры охрупчиваются и легко разрушаются. Однако фторопласт-4 не имеет такой температуры, он сохраняет гибкость и не становится хрупким даже при температуре жидкого гелия ( $-269,3\text{ °C}$ ) [11].

При более высоких температурах ( $T \geq T_{ст}$ ) аморфная фаза размягчается и переходит в *высокоэластическое состояние*, а кристаллические области сохраняются твердыми, обеспечивая жесткость фторопласта-4 вплоть до температуры плавления кристаллитов ( $T_{пл} = +327\text{ °C}$ ). В высокоэластическом состоянии подвижность молекулярных звеньев возрастает, придавая макромолекулам аморфной фазы способность принимать различные конформации и возможность переориентации под действием внешнего силового поля. В результате таких изменений возникает *высокоэластическая деформация*, которая по своей природе, величине и физическому проявлению принципиально отличается от упругой (гуковской) деформации. Она свойственна исключительно полимерам и обусловлена их молекулярным строением, в котором длинные молекулярные цепи, обладая высокой подвижностью и внутренней гибкостью, способны в условиях силового воздействия разворачиваться, выпрямляться, изгибаться или принимать другие формы, ориентируясь в направлении силы и значительно изменяя размеры элемента. После разгрузки процесс происходит в обратном направлении до полного восстановления исходного состояния. Таким образом, высокоэластическая деформация обратима, но имеет релаксационный характер и требует для установления равновесного состояния некоторого промежутка времени. Поскольку она достигает конечного значения и исчезает при разгрузке не мгновенно, а со временем, ее называют *запаздывающей деформацией*.

Возникновение высокоэластической деформации определяется, главным образом, поведением аморфных участков, состоящих из свободных и хаотично расположенных макромолекул, имеющих возможность при нагружении принимать любые формы и создавать деформации большой величины. Молекулярные же цепи кристаллической структуры, входящие в кристаллографическую решетку, являются зафиксированными и неспособными к большим деформациям. Однако с возрастанием силового воздействия в кристаллитах также возникают процессы, принципиально изменяющие свойства материала и приводящие к возникновению необратимых деформаций.

С увеличением нагрузки на фоне высокоэластической деформации начинается внутренняя перестройка (*рекристаллизация*) структуры, при которой происходит полное разрушение старых и образование новых кристаллических структур, ориентированных по направлению силы и обладающих другими свойствами. В процессе рекристаллизации участвует не только кристаллическая фаза, но и аморфная фаза, молекулы которой, принимая упорядоченное строение, создают новые кристаллиты, увеличивая кристаллическую часть структуры. В результате при рекристаллизации степень кристалличности полимера возрастает и чем больше она становится, тем меньшее влияние на деформационный процесс оказывает аморфная фаза и тем большую значимость в формировании свойств материала приобретает кристаллическая фаза. Именно кристаллическая структура и происходящие в ней рекристаллизационные процессы определяют деформационное поведение материала в условиях силового поля.

Рекристаллизация, начавшись при определенной нагрузке, происходит далее за счет теплового движения молекул, не требующего силовых затрат, а поэтому протекает при постоянном напряжении  $\sigma_{рекр}$  (*напряжение рекристаллизации*), являющемся одной из важнейших механических характеристик полимера. Структурная перестройка приводит к изменению свойств материала и образованию *остаточных* деформаций так же, как это происходит в металлах при пластической деформации. Ввиду этого момент наступления рекристаллизации рассматривает-

ся как *предельное состояние* материала, а  $\sigma_{\text{рекр}}$  считается *предельным напряжением*. Однако в отличие от металлов образование необратимых деформаций в полимерах происходит в результате нескольких процессов: за счет деформаций, возникающих и закрепляющихся в новой (рекристаллизованной) структуре, а также за счет истинно пластических деформаций вследствие перемещения кристаллитов по плоскостям скольжения и дефектам [6, 8, 11].

Высококристаллические полимеры даже при наличии незначительной аморфной фазы также обладают способностью к высокоэластической деформации, проявляемой в большей или меньшей степени в зависимости от кристалличности материала. Фторопласт-4 при  $T \geq T_{\text{ст}}$  также переходит в высокоэластическое состояние, которое сохраняется вплоть до температуры разложения ( $T_p = +415^\circ\text{C}$ ). Особенность свойств фторопласта-4 заключается в его неспособности переходить в вязкотекучее состояние, при котором макромолекулы перемещаются относительно друг друга и материал ведет себя подобно жидкости. Переход аморфной фазы в текучее состояние происходит при температуре текучести  $T_t$ , однако у фторопласта-4 вследствие высокой молекулярной массы  $T_t > T_p$  (рис. 3). Следовательно после расплавления кристаллической фазы и образования полностью аморфной структуры фторопласт-4 не превращается в вязкую жидкость, а остается твердым высокоэластичным материалом [12]. Таким образом, фторопласт-4 способен находиться только в двух твердых физических состояниях – стеклообразном и высокоэластическом, сохраняемым до температуры разложения  $T_p$ . При достижении  $T_p$  происходит деструкция молекул и фторопласт-4 начинает разлагаться [6–10].

Исследования показывают, что *растяжение* фторопласта-4 в высокоэластическом состоянии может приводить к удлинениям без разрушения до 500%, при этом материал проявляет достаточно высокую жесткость, сохраняемую вплоть до  $T_{\text{пл}}$  (рис. 3) [13]. Это обеспечивается высокой степенью кристалличности фторопласта-4, которая еще больше возрастает вследствие рекристаллизационных процессов, возникающих при силовом воздействии. Исследования фторопласта-4 на *сжатие* также подтверждают его высокоэластичные свойства и способность к деформированию до больших (часто, необратимых) обжатий без нарушения целостности. Такие деформации могут возникать даже в условиях низких температур и при незначительных нагрузках, что определяется *хладотекучестью* фторопласта-4 и рассматривается как его существенный недостаток для деталей, работающих под нагрузкой, или деталей с жесткими допусками. Так, по причине *хладотекучести* фторопластовые уплотнения обнаруживают нарушение герметичности при повышении давления, в ненагруженных или незначительно нагруженных деталях возникают необратимые деформации, которые образуются даже от собственного веса изделия и т. д. Природа хладотекучести также заключается в рекристаллизационных процессах, приводящих к уплотнению структуры и увеличению степени кристалличности материала.

Таким образом, при воздействии силового поля и вследствие фазовых превращений кристалличность фторопласта-4 возрастает и его *структура приближается к почти полному однофазному упорядоченному кристаллическому состоянию*. Это еще раз подтверждает правомерность принятия для материала модели сплошного, твердого, однородного тела со всеми характерными свойствами, присущими низкомолекулярным твердым телам. Несмотря на специфику свойств фторопласта-4, можно с определенным допущением рассматривать его деформационное поведение до разрушения как процесс, включающий в себя только *упругую* и *остаточную* деформации. При этом следует подразумевать, что *упругая* деформация состоит из двух обратимых деформаций – истинно упругой (*мгновенной*) и высокоэластической (*запаздывающей*), принимая для

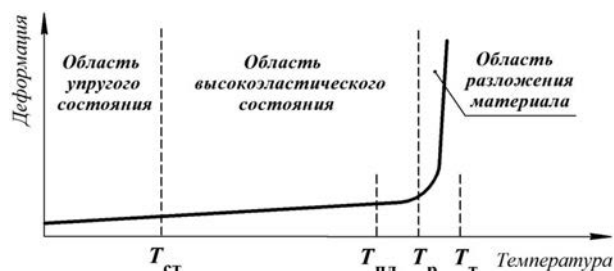


Рис. 3. Термомеханическая кривая фторопласта

обеих подчиненность закону Гука. Справедливость этого допущения по отношению к высокоэластической деформации, если ее величина не превышает 10%, подтверждается экспериментально [11]. Что касается *остаточной* (необратимой) деформации, то, как было отмечено выше, она является результатом рекристаллизационных процессов и истинно пластической деформации, возникающей в кристаллитах. Четкого разделения между этими

составляющими не существует и определить долю участия каждой из них в создании остаточных деформаций не представляется возможным. Однако, считая рекристаллизацию предельным состоянием материала и рассматривая ее как аналог пластической деформации в металлах, где важнейшей характеристикой прочности является предел текучести  $\sigma_T$ , такой величиной при расчете фторопластовых изделий следует считать  $\sigma_{\text{рекр}}$  – напряжение, при котором начинаются необратимые процессы и возникают необратимые деформации. Предел рекристаллизации  $\sigma_{\text{рекр}}$ , также называемый в литературе как предел хладотекучести или даже предел текучести (по аналогии с металлами), зависит от температуры и определяется по эмпирической формуле [11]:

$$\lg \sigma_{\text{рекр}} \text{ (МПа)} = -0,46834 + 483,64/T(\text{K}) \quad (2)$$

Следует заметить, что при деформировании кристаллических полимеров в силу сложности их строения в структуре могут возникать все деформации одновременно, проявляясь в большей или меньшей степени в зависимости от температуры [6]. Эта картина также характерна и для фторопласта-4: вследствие его высокой пластичности остаточная деформация в нем возникает даже при очень низких температурах и локально присутствует вместе с упругой, а затем и вместе с высокоэластической деформациями (рис. 4). Если при 4К она составляет всего несколько процентов, то с повышением температуры возрастает и при  $T \approx T_{\text{пл}}$  становится преобладающей деформацией [14].

**Заключение.** Анализ механического поведения фторопласта-4 в условиях силового воздействия показывает, что механизмы деформационных процессов, протекающих в полимере, по своему механическому проявлению во многом подобны механизмам, возникающим при деформировании классических твердых тел. Поэтому с учетом некоторых приближений и принятия определенной схематизации механических свойств материала становится возможным для математического описания деформационного поведения фторопласта-4 использование подходов и расчетных методик, разработанных в теориях упругости и пластичности для твердых деформируемых материалов. Возвращаясь к технологии изготовления фторопластовых колец [3, 4] и исследованию возможности их получения методом холодного деформирования, на основании проведенного анализа тогда можно предположить, что такая возможность реально осуществима, хотя и потребует выполнения определенных технологических приемов, связанных с релаксационными процессами, и соответствующего расчета инструмента, обеспечивающего получение готовых колец требуемого диаметра. Согласно исследованиям, процессы релаксации во фторопласте-4 при его деформировании в условиях комнатной температуры протекают в достаточно коротком промежутке времени и требуют для достижения деформациями конечной величины выдержки детали под нагрузкой в течение 3–4 ч [8, 15]. Что касается проектирования инструмента, то оправка для наматывания ленты должна быть рассчитана таким образом, чтобы после разгрузки и упругого пружинения конечный диаметр кольца соответствовал требуемому техническому размеру.

Возможность изготовления изделий из фторопласта-4 методом холодного формования в значительной степени определяется свойством хладотекучести материала, которое считается недостатком, однако в данной технологии является неоспоримым достоинством, позволяющим получать изделия требуемых размеров и формы при низкой температуре и невысоких нагрузках. Такой подход позволит за счет устранения из технологического процесса этапов нагрева и термофиксации детали сократить продолжительность рабочего цикла, увеличить производительность процесса и снизить его стоимость.

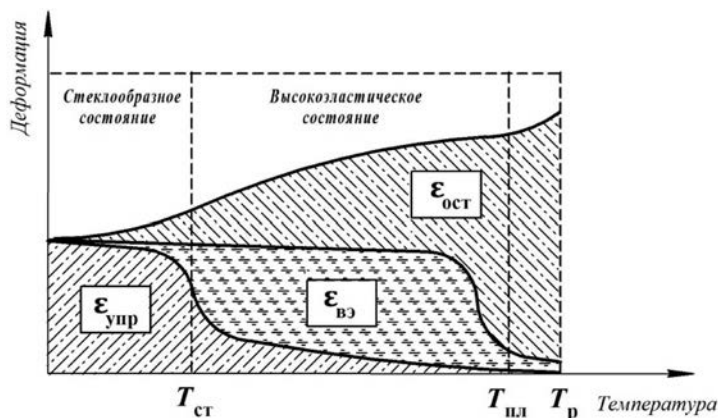


Рис. 4. Деформации в структуре фторопласта

### Список использованных источников

1. Брацьких, Е. А. Технология пластических масс / Е. А. Брацьких, Э. С. Шульгина. – Л.: Химия, 1982. – 328 с.
2. Пугачев, А. К. Переработка фторопластов в изделия / А. К. Пугачев, О. А. Росляков. – Л.: Химия, 1987. – 168 с.
3. Вершина, Г. А. Способ изготовления разрезного кольца из полимерного материала и устройство для его осуществления / Г. А. Вершина, А. Ю. Пилатов. Патент Республики Беларусь, ВУ № 14191, 2011.
4. Вершина, Г. А. Способ изготовления разрезных защитных колец из полимерного материала / Г. А. Вершина, А. Ю. Пилатов. Патент Республики Беларусь, ВУ № 19073, 2015.
5. Марихин, В. А. Надмолекулярная структура полимеров / В. А. Марихин, Л. П. Мясникова. – Л.: Химия, 1977. – 240 с.
6. Тагер, А. А. Физико-химия полимеров / А. А. Тагер. – М.: Химия, 1968. – 536 с.
7. Привалко, В. П. Молекулярное строение и свойства полимеров / В. П. Привалко. – Л.: Химия, 2006. – 238 с.
8. Каргин, В. А. Структура и механические свойства полимеров / В. А. Каргин. – М.: Наука, 1979. – 449 с.
9. Гуль, В. Е. Структура и механические свойства полимеров / В. Е. Гуль, В. Н. Кулезнев. – М.: Лабиринт, 1994. – 370 с.
10. Тугов, И. И. Химия и физика полимеров / И. И. Тугов, Г. И. Кострыкина. – М.: Химия, 2009. – 432 с.
11. Кнунянц, И. Л. Краткая химическая энциклопедия / И. Л. Кнунянц. В 3-х т. Т. 3. – М., 2013. – 560 с.
12. Кулезнев, В. Н. Химия и физика полимеров / В. Н. Кулезнев, В. А. Шершнеv. – М.: Высшая школа, 1988. – 312 с.
13. Карякина, М. И. Технология полимерных покрытий / М. И. Карякина, В. Е. Попцов. – М.: Химия, 1983. – 336 с.
14. Циклис, Д. С. Техника физико-химических исследований при высоких и сверхвысоких давлениях / Д. С. Циклис. – М.: Химия, 1965. – 416 с.
15. Климов, И. Я. Коррозия химической аппаратуры и коррозионноустойкие материалы / И. Я. Климов. – М.: Машиностроение, 1967. – 468 с.

### References

1. Bratsykhin, E. A. and Shul'gina, E. S. (1982), *Tekhnologiya plasticheskikh mass* [Technology of plastics], Khimiya, Leningrad, RU.
2. Pugachev, A. K. and Roslyakov, O. A. (1987), *Pererabotka ftoroplastov v izdeliya* [Processing fluoroplastic in products], Khimiya, Leningrad, RU.
3. Vershina, G. A. and Pilatov, A. Ju. (2011), *Sposob izgotovleniya razreznogo kol'tsa iz polimernogo materiala i ustroistvo dlya ego osushchestvleniya* [Way of manufacturing of a cutting ring from a polymeric material and the device for its realisation], Baza patentov Respubliki Belarus, BY, Pat. 14191.
4. Vershina, G. A. and Pilatov, A. Ju. (2015), *Sposob izgotovleniya razreznnykh zashchitnykh kolets iz polimernogo materiala* [Way of manufacturing of cutting protective rings from a polymeric material], Baza patentov Respubliki Belarus', BY, Pat. 19073.
5. Marikhin, V. A. and Myasnikova, L. P. (1977), *Nadmolekulyarnaya struktura polimerov* [Supramolecular structure of polymers], Khimiya, Leningrad, RU.
6. Tager, A. A. (1968), *Fiziko-khimiya polimerov* [Fiziko-himiya polymers], Khimiya, Moscow, RU.
7. Privalko, V. P. (2006), *Molekulyarnoe stroenie i svoistva polimerov* [Molecular structure and properties of polymers], Khimiya, Leningrad, RU.
8. Kargin, V. A. (1979), *Struktura i mekhanicheskie svoistva polimerov* [Structure and mechanical properties of polymers], Nauka, Moscow, RU.
9. Gul', V. E. and Kuleznev, V. N. (1994), *Struktura i mekhanicheskie svoistva polimerov* [Structure and mechanical properties of polymers], Labirint, Moscow, RU.
10. Tugov, I. I. and Kostrykina, G. I. (2009), *Himiya i fizika polimerov* [Chemistry and physics of polymers], Khimiya, Moscow, RU.
11. Knunyants, I. L. (2013), *Kratkaya khimicheskaya entsiklopediya* [Short chemical encyclopedia. In three volumes. Volume 1], Ripol Klassik, Moscow, RU.
12. Kuleznev, V. N. and Shershnev, V. A. (1988), *Khimiya i fizika polimerov* [Chemistry and physics of polymers], Vysshaya shkola, Moscow, RU.
13. Karyakina, M. I. and Poptsov, V. E. (1983), *Tekhnologiya polimernykh pokrytii* [Technology of polymeric coverings], Khimiya, Moscow, RU.
14. Tsiklis, D. S. (1965), *Tekhnika fiziko-khimicheskikh issledovaniy pri vysokikh i sverkhvysokikh davleniyakh* [Technique of physical and chemical researches with high and ultrahigh pressures], Khimiya, Moscow, RU.
15. Klimov, I. Ya. (1967), *Korroziya khimicheskoi apparatury i korroziionnostoikie materialy* [Corrosion of the chemical equipment and corrosion-resistant materials], Mashinostroenie, Moscow, RU.

### Информация об авторах

Вершина Георгий Александрович – кандидат технических наук, доцент, первый проректор. Белорусский национальный технический университет (220005, г. Минск, проспект Независимости, 65, Беларусь).

Реут Лариса Ефимовна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры сопротивления материалов машиностроительного профиля. Белорусский национальный технический университет (220005, г. Минск, проспект Независимости, 65, Республика Беларусь). E-mail: sopromat\_reut@mail.ru.

### Для цитирования

Вершина, Г. А. Анализ деформационного поведения фторопласта-4 в условиях силового воздействия / Г. А. Вершина, Л. Е. Реут // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2016. – № 4. – С. 23–30

### Information about the authors

Vershina Georgiy Aleksandrovich – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor, First Vice-Rector. Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220005, Minsk, Belarus).

Reut Larisa Efimovna – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor, the Department of resistance of materials of a machine-building profile. Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220005, Minsk, Belarus). E-mail: sopromat\_reut@mail.ru.

### For citation

Vershina G. A., Reut L. E. Analysis of deformation behaviour of fluoroplastic-4 in the conditions of power influence. Proceedings of the National academy of sciences of Belarus, physical-technical series. 2016, no. 4, pp. 23–30.

А. В. Алифанов<sup>1</sup>, Д. А. Ционенко<sup>2</sup>, А. М. Милукова<sup>1</sup>, Н. М. Ционенко<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Беларусь,

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь,

<sup>3</sup>Белорусский государственный педагогический университет им. Максима Танка, Минск, Беларусь

### МАГНИТОСТРИКЦИОННЫЙ МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНОЙ СТРУКТУРЫ В СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЯХ ПРИ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Показано, что при магнитно-импульсном воздействии на ферромагнитный образец реализуются условия, способствующие образованию мелкодисперсной структуры при приближении температуры поверхности образца к температуре Кюри. При наличии сильного магнитного поля вследствие магнитострикции происходит деформация ферромагнитных участков, которые сдвигаются относительно парамагнитных областей, локализованных вблизи границ зерен и границ доменов. В результате возникающих механических напряжений может происходить дробление зерен. Магнитострикция приводит не только к измельчению зерен феррита, но и к образованию упорядоченной структуры, поскольку дроблению подвергаются участки с определенной ориентацией кристаллических плоскостей.

*Ключевые слова:* стальные изделия, магнитно-импульсное воздействие, температура Кюри, магнитострикция, мелкодисперсная структура.

A. V. Alifanov<sup>1</sup>, D. A. Tsionenko<sup>2</sup>, A. M. Miliukova<sup>1</sup>, N. M. Tsionenko<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Physical Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,

<sup>2</sup>Belarusian state university of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus,

<sup>3</sup>Belarusian State Pedagogical University, named after Maxim Tank, Minsk, Belarus

### A MODEL OF SMALL-DISPERSED STRUCTURE FORMATION IN STEEL PRODUCTS BY MAGNETIC-PULSE ACTION DUE TO MAGNETOSTRICTION

It is established that in magneto static fields, which can really be used in industrial equipment, the magnitude of electromagnetic energy is not sufficient for phase equilibrium changing. However, in pulse magnetic field, ones can obtain the changing of phase equilibrium for surface layer of ferromagnetic work material. The thickness of material layers is comparable with skin depth. It is shown, that the magnetic-pulse action on ferromagnetic sample surface provides conditions for formation of small-dispersed structure when the temperature approaches to the Curie temperature. In the presence of strong magnetic field, deformations of ferromagnetic regions arise due to magnetostriction, which are displaced relative to paramagnetic regions localized near the grain and domain boundaries. It leads to a disintegration of ferrite grains and to formation of an anisotropic structure since the regions with specific orientation of crystal planes are disintegrated by magnetostriction.

*Keywords:* steel products, magnetic-pulse action, the Curie temperature, magnetostriction, small-dispersed structure.

**Введение.** Известно, что значимые структурные изменения и улучшение свойств стали при термической обработке в магнитном поле обусловлены каталитическим действием поля на развитие превращений в случае, если исходная фаза парамагнитна, а продукты превращения обладают ферромагнитными свойствами [1–3].

При магнитно-импульсном воздействии на стальные изделия происходит локальное выделение теплоты вследствие протекания индукционных токов. Установлено [1], что локальность нагрева определяется неоднородностью структуры стального изделия. Максимальная температура в процессе обработки в области границ зерен может достигать 1100 °С, что достаточно для осуществления процессов рекристаллизации. Вследствие адиабатического характера тепловыделения, связанного с малой скоростью отвода тепла, в области зерна вблизи его границы температура ферромагнитного материала близка к температуре Кюри и на самой границе превосходит ее [1]. С этой точки зрения процесс магнитно-импульсной обработки подобен термической обработке металлических сплавов в магнитном поле [4–7].

Внешнее импульсное магнитное поле определяет термодинамику и кинетику фазовых переходов, что приводит к формированию мелкодисперсной структуры на поверхности образца.

При этом устойчивые изменения структуры вызывают модификацию свойств, полезных для эксплуатации [8–10].

**Результаты исследований и их обсуждение.** Известно [2–4], что технология термической обработки сплавов в магнитном поле напряженностью до 2,4 МА/м способствует аналогичной модификации доменной и кристаллической структур ферромагнетика, как и магнитно-импульсная обработка при максимальной напряженности магнитного поля порядка  $10^8$  А/м и времени импульса  $10^{-3}$  с [11]. Указанные характеристики импульса реализуются в разработанных и изготовленных в Физико-техническом институте НАН Беларуси магнитно-импульсных установках. Отличительной особенностью технологии термической обработки сплавов в магнитном поле является то, что модификация структуры стального образца происходит по всему объему, в то время как для магнитно-импульсной обработки характерно воздействие только на поверхность. Глубина обработки составляет 10–100 мкм и определяется толщиной  $\delta$  скин-слоя ферромагнитного образца:

$$\delta = \sqrt{2\rho/\mu\mu_0\omega}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление образца, Ом·м;  $\mu$  – магнитная проницаемость среды, Гн/м;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная в единицах СИ;  $\omega = (\sqrt{LC})^{-1}$  – циклическая частота колебаний контура, определяемая индуктивностью магнитного поля  $L$  и емкостью  $C$  конденсаторов магнитно-импульсной установки при малом значении сопротивления цепи, с $^{-1}$ .

Подстановка численных величин, входящих в формулу (1), усредненных по объему образца и характерных для стали ( $\rho = 10^{-7}$  Ом·м,  $\mu = 10^3$ ), и значения  $\omega \approx 10^4$  с $^{-1}$ , определяемого параметрами установки, дает толщину упрочненного слоя порядка  $10^{-4}$  м.

Магнитное поле может существенно влиять на фазовые переходы первого рода, если исходные фазы, подвергаемые обработке и расположенные в непосредственной близости друг от друга ( $10^{-11}$ – $10^{-10}$  м), значительно отличаются по намагниченности (например, как парамагнетик от ферромагнетика). Именно такая структура возникает в зерне феррита при магнитно-импульсном воздействии на стальные заготовки [12, 13].

Влияние магнитного поля проявляется, главным образом, в увеличении значений равновесной температуры перехода, связанного с рекристаллизацией, а также объемной скорости превращения. Изменение температуры равновесия фаз при воздействии магнитного поля может быть найдено так же, как в соотношении Клайперона – Клаузиуса [2, 3]. Если фазовый переход осуществляется в однокомпонентной системе (полиморфное превращение) или в твердом растворе по бездиффузионному механизму (мартенситное превращение в стали), термодинамический потенциал замкнутой системы определяется из следующего соотношения:

$$\Phi = U - TS + \sum_i F_i dx_i, \quad (2)$$

где  $U$ ,  $T$ ,  $S$  – соответственно внутренняя энергия, абсолютная температура, энтропия;  $F_i$ ,  $x_i$  – обобщенные сила и координата;  $\sum F_i dx_i$  – работа, совершаемая системой против внешнего давления. Вводятся следующие обозначения обобщенных сил и координат:  $F_1 = P$  (давление);  $x_1 = V$  (объем); поверхностные силы:  $F_2 = \gamma$  (коэффициент поверхностного натяжения);  $x_2 = A$  (площадь поверхности);  $F_3 = H$  (напряженность магнитного поля),  $x_3 = I$  (намагниченность). Если одна из фаз, участвующих в превращении, обладает ферромагнитными свойствами, то внешнее магнитное поле снижает термодинамический потенциал данной фазы на величину  $\delta\Phi = H\delta I$ . В результате система становится более стабильной:

$$\Phi_H = U - TS + PV - HI. \quad (3)$$

Условия равновесия фаз в однокомпонентной системе (или в растворах при отсутствии диффузии примесей) с учетом переменных  $T$ ,  $P$  и  $H$  можно записать в виде

$$\Phi_1(T, P, H) = \Phi_2(T, P, H). \quad (4)$$



Продифференцируем правую и левую части равенства (4) по изменениям  $T$  и  $H$  при  $P = \text{const}$ :

$$\partial\Phi_1/\partial T + (\partial\Phi_1/\partial H)(\partial H/\partial T) = \partial\Phi_2/\partial T + (\partial\Phi_2/\partial H)(\partial H/\partial T). \quad (5)$$

Поскольку  $\partial\Phi/\partial T = -S$ ,  $\partial\Phi/\partial H = -M = -IV$ , где  $M$  – полный дипольный магнитный момент, то

$$dT/dH = (M_1 - M_2)/(S_2 - S_1). \quad (6)$$

Учитывая, что  $S_2 - S_1 = q/T_0$ , где  $q$  – теплота превращения, а  $T_0$  – равновесная температура рекристаллизации, получаем

$$dT = [(I_1V_1 - I_2V_2) T_0/q] dH. \quad (7)$$

Изменение температуры фазового перехода  $\Delta T$  при воздействии внешнего поля напряженностью  $H$  определяется интегрированием дифференциального соотношения (7). Условия такого интегрирования для случая, когда одна или обе фазы находятся в ферромагнитном состоянии, определены в [2] и сводятся к тому, что значения  $T_0$ ,  $q$ ,  $V_1$  и  $V_2$  могут считаться постоянными и не зависящими от поля, при условии  $\Delta T < T_0$  и любая температура от  $T_0(H = 0)$  до  $T_0(H)$  не превышает точку Кюри [3]. Условие равенства объемов позволяет учитывать магнитоэстрокиционные явления как малые поправки к изменению температуры рекристаллизации. В связи с этим можно пренебречь также полем анизотропии и полем размагничивания (для тел малого размера или с малым размагничивающим фактором) и полагать при этом, что величина  $M = IV$  и не зависит от  $H$ . Тогда, например, для фазового превращения исходной парамагнитной ( $M_2 = 0$ ) фазы (аустенит) в ферромагнитную фазу (мартенсит) воздействие внешнего поля  $H$  должно привести к повышению температуры равновесия  $T_0$  на величину [12]

$$\Delta T = T_0V_1I_1H/q. \quad (8)$$

Соотношение (8) показывает, что для принятых условий значение  $\Delta T$  линейно зависит от величины напряженности магнитного поля. Так, для углеродистой стали при  $T_0 = 500$  К,  $I_1 = 0,17$  Тл,  $q/V_1 = 420$  МДж/м<sup>3</sup> воздействие магнитного поля ( $H = 1,6$  МА/м) во время мартенситного превращения дает  $\Delta T = 4$  К [12]. Ввиду этого существенных изменений фазового состава, морфологии и свойств продуктов превращения не происходит. Например, по приближенной оценке уменьшение количества остаточного аустенита, вызванное повышением температуры на 8 °С, для стали с 1,0% С составляет около 1,2%. Зависимость (8) показывает, что существенные изменения в термодинамике фазовых превращений могут быть обеспечены при использовании магнитных полей на порядок более высоких, чем поле напряженностью 1,6–2,0 МА/м, что достигается при магнитно-импульсном воздействии.

В соответствии с соотношением (8) фазовый переход от ферромагнитной к парамагнитной фазе под воздействием внешнего магнитного поля приводит к расширению области существования фазы, обладающей парамагнитными свойствами. В общем случае перехода между двумя ферромагнитными фазами расширяется область существования той фазы, у которой больше величина намагниченности.

Сдвиг температуры равновесия в сверхсильных полях ( $H \approx 25$  МА/м) может достигать 30–60 °С ввиду того, что наибольшая из составляющих полной магнитной энергии  $E = IH$  имеет значение 50 МДж/м<sup>3</sup> и обуславливает более заметное уменьшение термодинамического потенциала ферромагнитной фазы.

Таким образом, в постоянных магнитных полях, которые реально можно использовать в установках промышленного типа, величины магнитной энергии недостаточно для существенного изменения условий фазового равновесия. Однако при импульсном магнитном поле можно достигнуть изменения фазового равновесия для поверхностного слоя, сравнимого с толщиной скин-слоя.

Полная энергия ферромагнетика определяется не только взаимодействием вектора спонтанной намагниченности с внешним полем, но и представляет собой сумму нескольких компонент. К ним относятся: энергия кристаллографической магнитной анизотропии  $E_K$ , магнитоупругая

энергия магнитострикционных деформаций  $E_\lambda$ , энергия индуцированной одноосной анизотропии  $E_n$ , магнитоэлектронная энергия (энергия ориентации ферромагнитных частиц по отношению к внешнему полю)  $E_o$ . Расчеты, выполненные в [12], показывают, что из составляющих полной энергии ферромагнетика в магнитном поле напряженностью 1,6 МА/м наибольшими являются собственно магнитная энергия  $E_1 = IH$  и разность магнитоэлектронных энергий  $\Delta E_o = I^2 \Delta N_p$  (где  $\Delta N_p$  – размагничивающий фактор), приводящая к увеличению вероятности ориентированного расположения ферромагнитных тел во внешнем магнитном поле. Величина полной энергии ферромагнетика имеет диапазон 1,5–3,0 МДж/м<sup>3</sup> и на два порядка меньше величины движущей силы основных фазовых превращений. Очевидно, что внешнее магнитное поле напряженностью 1,6–2,0 МА/м не может коренным образом повлиять на условия равновесия при фазовых превращениях.

Однако полученные в [13–17] экспериментальные данные дают основание полагать, что влияние слабых постоянных магнитных полей в процессе фазовых превращений более значительно, чем этого можно было ожидать из термодинамических оценок изменения равновесных температур переходов. Структурные исследования [9, 10], иллюстрирующие влияние магнитного поля на мартенситное превращение, показали, что количество остаточного аустенита при закалке в магнитном поле напряженностью 1,76 МА/м в среднем на 10–15% меньше, чем после закалки без поля.

Данные рентгеноструктурного анализа [9] свидетельствуют об увеличении степени распада твердого раствора в процессе закалочного охлаждения в магнитном поле. При закалке в поле напряженностью 2 МА/м фиксируется структурное состояние, свойственное стали после обычной закалки и отпуска при 150 °С. Изучение структуры мартенсита показывает заметное увеличение дисперсности кристаллов  $\alpha$ -фазы. Таким образом, результаты [13–17] позволяют считать влияние постоянного магнитного поля напряженностью до 2,4 МА/м в процессе фазовых переходов достаточным для заметных структурных изменений в углеродистых сталях.

Вклад энергии магнитного поля должен прежде всего влиять на критическую стадию зарождения и роста мартенсита, поскольку вероятность зарождения обычно зависит от разности термодинамических потенциалов фаз как  $\exp(-\Delta F/RT)$ , и малые различия в энергии критического зародыша могут существенно изменить эту вероятность в условиях, когда процесс термодинамически возможен. По этой причине рассмотрение вопроса только с термодинамических позиций недостаточно, поскольку при таком подходе упускается из виду влияние поля на механизм образования ферромагнитных зародышей и кинетику фазовых реакций, которые определяют строение и свойства конечного состояния. В условиях, при которых превращение термодинамически возможно, даже небольшой энергетический стимул может оказать каталитическое влияние на кинетику. В связи с этим в дальнейшем целесообразно выявить особенности механизма образования ферромагнитных зародышей под действием внешнего магнитного поля при фазовых переходах [18].

**Заключение.** В результате магнитно-импульсной обработки отдельные участки зерна феррита нагреваются до температур, близких к температуре Кюри, при которой происходит магнитное превращение стали, связанное с переходом из ферромагнитного в парамагнитное состояние. Этот процесс является фазовым переходом второго рода, следовательно, при приближении температуры к точке Кюри происходит уменьшение размеров доменов ферромагнетика до полного их исчезновения. Однако при температурах, близких к температуре Кюри, возникает неоднородная структура, в которой малые по размеру домены окружены парамагнитными областями. При наличии сильного магнитного поля в области обработки вследствие магнитострикции происходит существенная деформация ферромагнитных участков, которые сдвигаются относительно областей с малым значением магнитной проницаемости. Если размеры остаточных доменов составляют порядка  $10^{-5}$  м, то делатационные и сдвиговые деформации ферромагнитной области относительно парамагнитной могут составлять  $10^{-10}$  м. Смещение может привести к разрыву связей между атомами на границе областей с различными магнитными свойствами и образованию межзеренной границы. Этот процесс может быть наиболее эффективным, когда в пределах зерна существуют домены с различной намагниченностью.

Магнитострикция обладает существенной анизотропией. Следовательно, изменение размеров определяется ориентацией кристаллической решетки относительно направления вектора намагниченности. Вследствие этого фактора могут происходить образование дополнительной границы и деление зерен по линии раздела объемных дефектов. В частности, наличие фрагментов, ориентация которых отличается от ориентации кристаллической решетки основной части зерна, играет существенную роль при образовании мелкозернистой структуры в процессе импульсной обработки. Таким образом, магнитострикция приводит не только к измельчению зерен феррита, но и к образованию упорядоченной структуры, поскольку дроблению будут подвергаться только участки с определенной ориентацией кристаллических плоскостей. Последнее может привести к возникновению анизотропии материала на поверхности обрабатываемого образца.

### Список использованных источников

1. Алифанов, А. В. Механизм упрочнения легированных сталей в импульсном магнитном поле / А. В. Алифанов, Ж. А. Попова, Н. М. Ционенко // *Литье и металлургия*. – 2012. – № 4. – С. 28–35.
2. Кривоглаз, М. А. Закалка стали в магнитном поле / М. А. Кривоглаз, В. Д. Садовский, Л. В. Смирнов, Е. А. Фокина. – М.: Наука, 1977. – 119 с.
3. Бернштейн, М. Л. Термомангнитная обработка стали / М. Л. Бернштейн. – М.: Металлургия, 1968. – 95 с.
4. Пустовойт, В. Н. Физические и технологические основы термической обработки в магнитном поле: автореф. дис... д-ра техн. наук / В. Н. Пустовойт, ФТИ АН БССР. – Минск, 1980. – 40 с.
5. Домбровский, Ю. М. Структура и свойства чугунов после термической обработки в магнитном поле: автореф. ... канд. техн. наук / Ю. М. Домбровский. – Ростов н/Д, 1975. – 20 с.
6. Блиновский, В. А. Исследование превращений, особенностей структуры и остаточных напряжений при закалке и отпуске железоуглеродистых сплавов в магнитном поле: автореф. ... канд. техн. наук / В. А. Блиновский. – Ростов н/Д, 1978. – 28 с.
7. Корнилов, Ю. А. Исследование процессов термической обработки инструмента в магнитном поле: автореф. ... канд. техн. наук / Ю. А. Корнилов. – Новочеркасск, 1984. – 16 с.
8. Гришин, С. А. Влияние термической обработки в магнитном поле на характеристики разрушения стали: автореф. ... канд. техн. наук / С. А. Гришин. – Новочеркасск, 1983. – 21 с.
9. Сорочкина, О.Ю. Структура и свойства инструментальных сталей после термической обработки в магнитном поле: автореф. ... канд. техн. наук / О. Ю. Сорочкина. – Ростов н/Д, 2005. – 24 с.
10. Бернштейн, М. Л. Термическая обработка стальных изделий в магнитном поле / М. Л. Бернштейн, В. Н. Пустовойт. – М.: Машиностроение, 1987. – 255 с.
11. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка металлических изделий / А. В. Алифанов [и др.] // *Технология ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, инструмента и технологической оснастки: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 10–13 апр. 2007.* – СПб, 2007. – Ч. 2. – С. 9–15.
12. Пустовойт, В. Н. О влиянии магнитного поля на мартенситное превращение в чугуне / В. Н. Пустовойт // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 1975. – № 12.
13. Пустовойт, В. Н. Особенности строения  $\alpha$ -мартенсита при закалке в постоянном магнитном поле / В. Н. Пустовойт // *Изв. АН СССР. Металлы.* – 1978. – № 6.
14. О возможностях и области использования закалки в постоянном магнитном поле / В. Н. Пустовойт [и др.] // *Изв. СКНЦ ВШ. Технические науки.* – 1979. – № 1.
15. Пустовойт, В. Н., Влияние термической обработки в магнитном поле на механические свойства углеродистых сталей / В. Н. Пустовойт, П. И. Русин, С. А. Гришин // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 1982. – № 7.
16. Пустовойт, В. Н. Особенности процесса образования аустенита при высокочастотном нагреве в магнитном поле / В. Н. Пустовойт // *Изв. вузов. Черная металлургия.* – 1983. – № 4.
17. Пустовойт, В.Н. Структурные эффекты при термической обработке сталей в магнитном поле / В. Н. Пустовойт, С. Н. Холодова // *Изв. ВоГТУ. Сер.2 «Прогрессивные технологии в машиностроении».* – 2003. – Вып. 6.
18. Об одной модели образования зародышей мартенсита в магнитном поле / В. Н. Пустовойт [и др.] // *Изв.СКНЦ ВШ. Технические науки.* – 1974. – №4.

### References

1. Alifanov, A. V., Popova, Zh. A. and Tsionenko, N. M. (2012), "The mechanism of hardening of alloy steels in pulsed magnetic field", *Lit'e i metallurgiya* [Casting and metallurgy], no. 4, pp. 28–35.
2. Krivoglaz, M. A., Sadovskii, V. D., Smirnov, L. V. and Fokina, E. A. (1977), *Zakalka stali v magnitnom pole* [Quenching of steel in magnetic field], Nauka, Moscow, RU.
3. Bernshtein, M. L. (1968), *Termomagnitnaya obrabotka stali* [Thermomagnetic treatment of steel], Metallurgiya, Moscow, RU.
4. Pustovoit, V. N. (1980), "Physical and technological bases of thermal treatment in a magnetic field", Abstract of D. Sc. Dissertation, Metallurgy and heat treatment of metals, FTI AN BSSR, Minsk, BY.

5. Dombrovskii, Yu. M. (1975), "Structure and properties of cast irons after heat treatment in a magnetic field", Abstract of Ph. D. dissertation, Metallurgy and heat treatment of metals, Rostovskii-na-Donu institut sel'skokhozyaistvennogo mashinostroeniya, Rostov n/D, RU.
6. Blinovskii, V. A. (1978), "The study of transformations, structure and residual stresses during quenching and tempering of iron-carbon alloys in a magnetic field", Abstract of Ph. D. dissertation, Metallurgy and heat treatment of metals, Rostov n/D, RU.
7. Kornilov, Yu. A. (1984), "Research of processes of heat treatment of the tools in a magnetic field", Abstract of Ph. D. dissertation, Materials Science, Novocherkassk, RU.
8. Grishin, S. A. (1983), "The effect of heat treatment in magnetic field on fracture characteristics of steel", Abstract of Ph. D. dissertation, Materials Science, Novocherkassk, RU.
9. Sorochkina, O. Yu. (2005), "Structure and properties of tool steels after heat treatment in a magnetic field", Abstract of Ph. D. dissertation, Materials Science, Donskoi gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, Rostov n/D, RU.
10. Bernshtein, M. L. and Pustovoi, V. N. (1987), *Termicheskaya obrabotka stal'nykh izdelii v magnitnom pole* [Heat treatment of steel products in a magnetic field], Mashinostroenie, Moscow, RU.
11. Alifanov, A. V., Anisovich, A. G., Amelyanchik, S. A. and Krivonos, Yu. I. (2007), "Magnetic pulse hardening treatment of metal products", *Tekhnologiya remonta, vosstanovleniya i uprochneniya detalei mashin, mekhanizmov, instrumenta i tekhnologicheskoi osnastki: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Sankt-Peterburg, 10–13 apr. 2007* [The technology of repair, restoration and strengthening of machine parts, machinery, tools and tooling: Materials Intern. scientific-practical. Conf., St. Petersburg, 10–13 April. 2007], SPb, RU, Ch. 2, pp. 9–15.
12. Pustovoi, V. N. (1975), "On the influence of magnetic field on martensitic transformation in cast iron", *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metallurgy and heat treatment of metals], no. 12.
13. Pustovoi, V. N. (1978), "The structural features of  $\alpha$ -martensite in quenching in a constant magnetic field", *Izv. AN SSSR. Metally* [Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Metals], no. 6.
14. Pustovoi, V. N., Rusin, P. I., Dombrovskii, Yu. M. and Blinovskii, V. A. (1979), "About the possibilities and the use of annealing in a constant magnetic field", *Izv. SKNC VSH. Tekhnicheskije nauki* [Proceedings of the North Caucasian scientific center of high school. Technical science], no. 1.
15. Pustovoi, V. N., Rusin, P. I. and Grishin, S. A. (1982), "The effect of heat treatment in magnetic field on the mechanical properties of carbon steels", *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metallurgy and heat treatment of metals], no. 7.
16. Pustovoi, V. N. (1983), "Features of formation of austenite in the high-frequency heating in a magnetic field", *Izv. VUZov. Chernaya metallurgiya* [Proceedings of the higher educational institutions. Ferrous metallurgy], no. 4.
17. Pustovoi, V. N. and Holodova, S. N. (2003), "Structural effects during heat treatment of steels in a magnetic field", *Izv. VoGTU. Ser.2 "Progressivnye tekhnologii v mashinostroenii"* [News of Volgograd State Technical University. Series 2 "Progressive Technologies in Mechanical Engineering"], issue 6.
18. Pustovoi, V. N., Rusin, P. I., Dombrovskii, Yu. M. and Blinovskii, V. A. (1974), "A model of the nucleation of martensite in magnetic field", *Izv. SKNC VSH. Tekhnicheskije nauki* [Proceedings of the North Caucasian scientific center of high school. Technical science], no. 4, pp. 56–58.

### Информация об авторах

Алифанов Александр Викторович – доктор технических наук, профессор, заведующий отделом объемных гетерогенных систем. Физико-технический институт НАН Беларуси (220141, г. Минск, ул. Купревича, 10, Беларусь). E-mail: alifanov\_aav@mail.ru

Ционенко Дмитрий Александрович – кандидат физико-математических наук, доцент, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, Беларусь). E-mail: tsiond@tut.by

Милиукова Анна Михайловна – кандидат технических наук, заведующий лабораторией. Физико-технический институт НАН Беларуси (220141, г. Минск, ул. Купревича, 10, Беларусь). E-mail: annart@mail.ru

Ционенко Наталья Михайловна – преподаватель, Белорусский государственный педагогический университет им. Максима Танка, (220030, г. Минск, ул. Советская, 18). E-mail: tsionn@tut.by

### Для цитирования

Алифанов, А. В. Магнотриксционный механизм образования мелкодисперсной структуры в стальных изделиях при магнитно-импульсном воздействии / А. В. Алифанов, Д. А. Ционенко, А. М. Милиукова, Н. М. Ционенко // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2016. – №4. – С. 31–36.

### Information about the authors

Alifanov Alexandr Viktorovich – D. Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department of the volumetric heterogeneous systems. Physical Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Kuprevich str., 220141, Minsk, Belarus). E-mail: alifanov\_aav@mail.ru

Tsionenko Dmitry Alexandrovich – Ph. D. (Physics and Mathematics), Assistant Professor. Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovkiy str., 220013, Minsk, Belarus). E-mail: tsiond@tut.by

Miliukova Anna Michailovna – Ph. D. (Engineering), Head of laboratory, Physical Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Kuprevich str., 220141, Minsk, Belarus). E-mail: annart@mail.ru

Tsionenko Natalia Michailovna – lecturer. Belarusian State Pedagogical University, named after Maxim Tank (18, Sovetskaya street, 220030, Minsk, Belarus). E-mail: tsionn@tut.by.

### For citation

Alifanov A. V., Tsionenko D. A., Miliukova A. M., Tsionenko N. M. Model of small-dispersed structures formation in steel products by magnetic-pulse action due to magnetostriction. Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. physical-technical series. 2016, no. 4, pp. 31–36.

**МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА**  
**MECHANICAL ENGINEERING AND MECHANICS**

УДК 621.923

Поступила в редакцию 26.06.2015

Received 26.06.2015

**Л. М. Акулович, А. В. Миранович, О. Н. Ворошухо**

*Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Беларусь,*

**УПРАВЛЕНИЕ ОБРАБОТКОЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН  
В ПРОЦЕССАХ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ  
И МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ**

Рассматривается влияние характера магнитного поля на процессы магнитно-электрического упрочнения и магнитно-абразивной обработки деталей машин. Установлены режимы магнитно-электрического упрочнения для получения наибольшей стабильности процесса. Предложена схема магнитно-абразивной обработки с целью интенсификации процесса путем регенерации ферроабразивной щетки.

*Ключевые слова:* магнитно-электрическое упрочнение, магнитно-абразивная обработка, магнитное поле, ферроабразивная щетка.

*L. M. AKULOVICH, A. V. MIRANOVICH, O. N. VOROSHUHO*

*Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Belarus*

**CONTROL OF MACHINE COMPONENTS SURFACING DURING MAGNETIC-ELECTRIC HARDENING  
AND MAGNETIC-ABRASIVE MACHINING**

The influence of nature of magnetic field on processes of magnetic-electric hardening and magnetic-abrasive machining of machine parts is examined. Modes of magnetic-electric hardening are set in order to obtain the highest process stability. A scheme of magnetic-abrasive machining is offered to intensify the process by regenerating the ferro-abrasive brush.

*Keywords:* magnetic-electric hardening, magnetic-abrasive machining, magnetic field, ferro-abrasive brush.

**Характер магнитного поля, генерируемого электромагнитными катушками.** Общность процессов магнитно-электрического упрочнения (МЭУ) и магнитно-абразивной обработки (МАО) состоит в образовании в рабочем зазоре  $\delta$  (рис. 1, а) цепочек ферромагнитного или ферроабразивного порошка (ФМП, ФАП). Влияние квазистационарного внешнего магнитного поля на образовавшиеся цепочки описывается основными уравнениями Максвелла [1, 2]

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \gamma \vec{E}, \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (2)$$

где  $\gamma$  – удельная проводимость среды, См/м;  $\vec{H}$  – вектор напряженности внешнего магнитного поля, А/м;  $\vec{E}$  – вектор напряженности электрического поля, В/м;  $\vec{B}$  – вектор индукции магнитного поля, Тл.

Так как внешнее магнитное поле в рабочем зазоре генерируется электромагнитом, то при расчетах можно пренебречь токами смещения  $\partial \vec{D} / \partial t$  и использовать дифференциальный закон

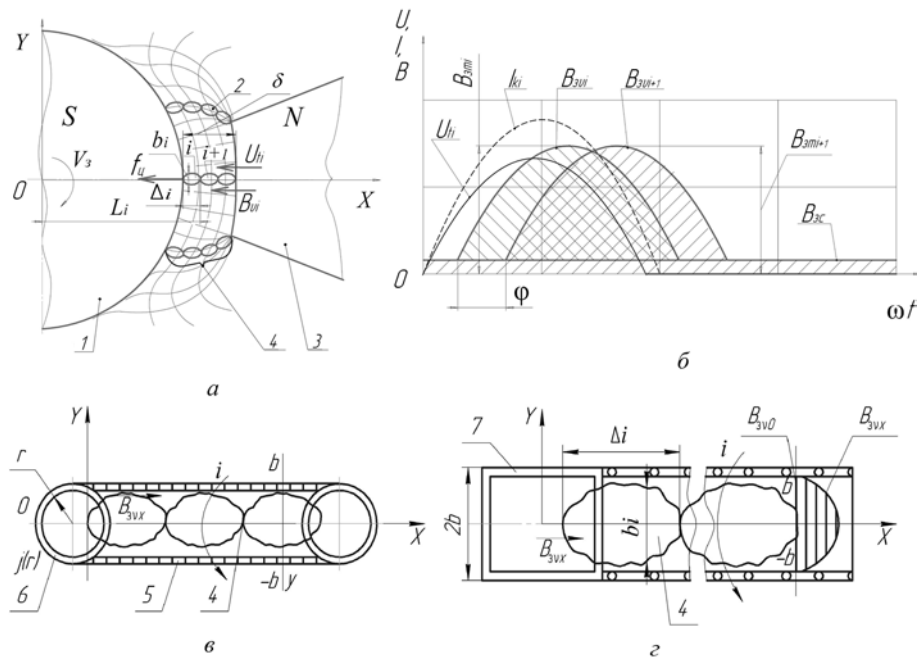


Рис. 1. Схема действия силы прижима  $f_u$  на цепочку ФМП и картина магнитного поля в рабочем зазоре устройств МЭУ и МАО (а), временная диаграмма тока электромагнита ( $I_{ki}$ ) и напряжения источника питания технологического тока ( $U_n$ ), индукций в рабочем зазоре (б), схема цепочки ФМП в рабочем зазоре при расчете индукции с проводником цилиндрической формы (е) и прямоугольной формы (z): 1 – заготовка; 2 – частица порошка; 3 – полюсный накопечник; 4 – цепочка ФМП, 5 – проводник-цилиндр, 6 – соленоид, 7 – плоский соленоид

Ома для токов проводимости [2]. В систему уравнений переменного магнитного поля входят уравнения непрерывности линий магнитной индукции и полного тока [2, 3]:

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0, \operatorname{div} \vec{D} = 0. \quad (3)$$

Выбрав направление силовых линий за ось  $X$  системы координат (рис. 1, e, z), для отличной от нуля компоненты магнитного поля  $B_{3vx}$  из уравнения соленоидальности (3) получим  $(\partial/\partial x)B_{3vx} = 0$  и магнитная индукция может изменяться только поперек направления силовых линий. На основании этого рассмотрим воздействие нестационарного внешнего магнитного поля на цепочку ФМП (рис. 1, e), которая сориентирована вдоль силовой линии (по оси  $X$ ). Примем следующие допущения: цепочку ФМП (рис. 1, z), состоящую из частиц ФМП с размерами малой ( $b_i$ ) и большой ( $\Delta_i$ ) осей, будем рассматривать как однородный проводник, представляющий собой трубку тока в виде сплошного цилиндра 5 (рис. 1, e), у которого величины  $\gamma$ ,  $\epsilon_a$  и  $\mu_a$  постоянные.

В результате преобразования системы (1)–(2) по аналогии с [2], исключая вектор напряженности  $\vec{E}$ , получаем следующие уравнения:

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{1}{\gamma} \operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{H}, \quad (4)$$

или

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\frac{1}{\gamma \mu_a} \operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{B}.$$

где  $\mu_a$  – абсолютная магнитная проницаемость среды, Гн/м.

Аналогично [2], как и для вектора-потенциала  $\vec{A}$ , введем лапласиан векторного поля  $\Delta \vec{B} = -\operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{B} + \operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{B}$ .

Приняв за основу, что замкнутый магнитный поток на входе и выходе в объем равен 0, преобразуем уравнения (4) ( $\operatorname{div} \vec{B} = 0$ ):

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \frac{1}{\gamma \mu_a} \Delta \vec{B}. \quad (5)$$

Исключая из уравнения (5) вектор напряженности  $\vec{B}$  (плотность свободных зарядов в рассматриваемом проводнике  $\rho = 0$ ) и проведя такие же преобразования, получаем следующее уравнение:

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{1}{\gamma \varepsilon_a} \Delta \vec{E}, \quad (6)$$

где  $\varepsilon_a$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды, Ф/м.

Уравнения (5), (6) приведены для мгновенных значений векторов электромагнитного поля и являются уравнениями диффузии [2, 4]. В данном случае примем допущение: исследуемый объект рассматривается как соленоид 6, обеспечивающий воздействие однородного магнитного поля на сплошной проводник (цилиндр) 5, который находится соосно соленоиду (рис. 1, в). После отключения питания соленоида происходит снижение величины магнитного поля внутри проводника до определенного значения, так как в цилиндре присутствуют круговые токи, индуцируемые вихревым электрическим полем. Они рассматриваются как система вставленных друг в друга соленоидов, которые не могут возбуждать стационарное магнитное поле на внешней стороне цилиндра.

В соответствии с [2] задача определения магнитного поля  $B_{3yx}(r, t)$  в самом проводнике (цепочке ФМП)  $r \leq b$  при  $t > 0$  сводится к уравнению

$$\frac{\partial B_{3yx}}{\partial t} = \frac{1}{\gamma \mu_a} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial B_{3yx}}{\partial r} \right), \quad (7)$$

где  $r$  – радиус проводника цилиндрической формы, м;  $t$  – текущее время, с.

Для рассматриваемого варианта уравнения (7) граничные условия будут:  $B_{3yx}(b, t) = 0$  (при  $t > 0$ ) и соответственно начальные условия –  $B_{3yx}(r, 0) = B_{3y0} = \mu_a i_{\text{п}} [2]$ . Здесь  $i_{\text{п}} = I/2r$  – поверхностная плотность тока проводника (ФМП), А/м [5];  $I$  – электрический ток питания электромагнита, А.

Решение поставленной задачи (7) допускается заменой цилиндрической формы соленоида (проводника тока) на прямоугольную форму со сторонами  $2b$  (рис. 1, г) [2, 4]. В соответствии с данным решением задача определения магнитной индукции и характера воздействия поля на цепочку ФМП примет следующий вид:

$$\frac{\partial B_{3yx}}{\partial t} = \frac{1}{\gamma \mu_a} \left( \frac{\partial^2 B_{3yx}}{\partial y^2} \right), \quad |y| < b, t > 0;$$

$$B_{3yx}(-b, t) = B_{3yx}(b, t) = 0, t > 0; \quad (8)$$

$$B_{3yx}(y, 0) = B_{3y0}, |y| \leq b.$$

Ее решение выполняется последовательно для одномерного уравнения диффузии в виде мультипликативных функций

$$B_{3yx}(y, t) = f(t) F(y). \quad (9)$$

В результате преобразований пошагового метода разделения переменных уравнения Лапласа [4] функций  $f(t)$ ,  $F(y)$  получены зависимости

$$\frac{f'(t)}{\nu f(t)} = \frac{F''(y)}{F(y)} = -k^2, \quad (10)$$

где  $\nu = 1/\gamma \mu_a$  – постоянная, м<sup>2</sup>/с;  $k^2$  – произвольная, описывающая затухающий характер квазистационарного магнитного поля в рабочем зазоре.

Преобразовав (9), (10), получим зависимости функций

$$f_n(t) = C_n e^{-\nu k_n^2 t}, \quad F_n(y) = \cos k_n y, \quad (11)$$

где  $C_n$  – коэффициент разложения в ряды Фурье;  $n$  – номер пространственной гармоники;  $k_n$  – коэффициент затухания магнитного поля в рабочем зазоре, 1/м.

Поскольку искомая функция является четной по переменной  $y$  (т. е. изменяется по косинусоидальному закону), принимаем  $k_n = \left(n - \frac{1}{2}\right) \frac{\pi}{b}$ .

В соответствии с методикой [4] формально составляем ряд Фурье, подставив зависимости (11) в уравнение (8)

$$B_{3vx}(y, t) = f_n(t) F_n(y) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{-\nu k_n^2 t} \cos k_n y. \quad (12)$$

Учитывая, что нулевые условия на границах  $y = \pm b$  удовлетворены, для решения (11) неопределенные коэффициенты ряда вычисляются из начального условия – функцию представляем в виде ступенчатой периодической, в пределах  $|y| \leq b$  принимающей постоянное значение  $B_{3v0}$ , на границах  $|y| = b, 3b, 5b, \dots$  меняющей знак на противоположный [2].

В результате составления рядов Фурье установлено, что показатели экспонент, которые имеют номер выше пространственной гармоники, затухают значительно быстрее. В соответствии с этим наибольшее влияние на процесс удержания цепочек ФМП в рабочем зазоре оказывают составляющие первой гармоники, коэффициент разложения которой равен  $C_1 = (4/\pi) B_{3v0} = (4/\pi) \mu_a i_{пр} = (4/\pi) \mu_a I / 2r$  [1, 2] с учетом несинусоидальности тока питания электромагнита, магнитной проницаемости и размеров частиц ФМП. В результате преобразования ряда выражение для определения магнитной индукции на поверхности и внутри цепочки-микроэлектрода примет следующий вид:

$$B_{3vx1}(y, t) = \frac{4}{\pi} B_{3vx0} e^{-\frac{1}{\gamma \mu_a} \left(\frac{\pi}{2b}\right)^2 t} \cos\left(\frac{\pi}{2b}\right) y = \frac{4}{\pi} B_{3vx0} e^{-\frac{t}{t_3}} \cos \frac{\pi y}{2b}, \quad (13)$$

где  $t_3 = \gamma \mu_a (2b)^2 / \pi^2$  – время, характеризующее затухание магнитного поля в проводнике (цепочке ФМП), с.

С учетом размеров частицы ФМП (рис. 1, з) величина времени, необходимая для затухания магнитного поля в цепочке-микроэлектроде (или проникновения на глубину частицы ФМП  $l_i = b_i / 2$ ), определяется по формуле

$$t_3 = \gamma \mu_a b_i^2 / 4,$$

где  $b_i$  – размер малой оси эллипсоида, описывающего  $i$ -ю частицу ФМП, м.

На основании выполненного численного расчета выражения (13) установлено, что значение величины магнитной индукции на поверхности цепочки ФАП составляет  $B_{3vx1} = 0,76$  Тл, а величина времени затухания магнитного поля в цепочке-микроэлектроде  $t_3 = 0,2 \cdot 10^{-3}$  с.

Анализ выражений (13) показал, что значения магнитной индукции переменны во времени. При этом гармонический характер изменения напряженности внешнего магнитного поля приводит к изменению во времени величин силы прижима  $f_{ц}$  частиц ФМП к обрабатываемой поверхности заготовки детали [10]:

$$f_{ц} = \frac{4}{3} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta_i^2 b_i K B_{vi}^2}{\mu(L_i + \Delta_i)}, \quad (14)$$

где  $n$  – число частиц в цепочке ФМП;  $L_i$  – расстояние от границы  $i$ -й частицы до оси упрочняемой поверхности, м;  $\Delta_i, b_i$  – размеры большой и малой осей эллипсоида, описывающего  $i$ -ю частицу ФМП, м;  $K$  – магнитная восприимчивость материала ФМП;  $B_{vi}$  – мгновенная индукция внешнего переменного магнитного поля на границе  $i$ -й частицы порошка в рабочем зазоре, Тл.

Следовательно, сила прижима  $f_{ц}$  цепочки ФМП к обрабатываемой поверхности определяется размерами его частиц и неоднородностью внешнего магнитного поля в рассматриваемой точке



рабочего зазора. Оно неоднородно и ограничено эквидистантными поверхностями полюсного наконечника и обрабатываемой поверхностью заготовки. Используемые электрические магниты, как нелинейные элементы электрической цепи в магнитной системе устройств МЭУ и МАО, генерируют индукцию  $B_{vi}$ , текущее значение которой непостоянно.

Влияние неоднородности переменного внешнего магнитного поля в рабочем зазоре на стабильность формирования и устойчивое положение цепочек ФМП рассмотрим с учетом амплитудной и временной составляющих индукции. Мгновенная индукция внешнего магнитного поля в точке  $(x_i, y_i)$  цепочки ФМП, находящейся в рабочем зазоре (рис. 1, б), изменяется по косинусоидальному закону [6, 7]

$$B_{3vi} = B_{3mi} \cos \omega t, \quad (15)$$

где  $B_{3mi}$  – амплитудная величина индукции внешнего магнитного поля в точке  $(x_i, y_i)$  цепочки ФМП, находящейся в рабочем зазоре, Тл;  $\omega$  – круговая частота магнитного поля, рад/с;  $t$  – текущее время, с.

В другой точке цепочки ФМП  $(x_{i+1}, y_{i+1})$  индукция внешнего магнитного поля может отличаться как по амплитуде, так и по фазе:

$$B_{3vi+1} = B_{3mi+1} \cos(\omega t + \varphi), \quad (16)$$

где  $\varphi$  – сдвиг по фазе между векторами индукций магнитного поля  $B_{3vi}$  и  $B_{3vi+1}$ , рад.

Учитывая, что для электромагнитных катушек стандартной I-образной конструкции, питаемых током промышленной частоты, угол  $\varphi$  мал (порядка  $5 \cdot 10^{-3}$  рад) [8], получаем

$$\frac{B_{3vi+1} - B_{3vi}}{B_{3vi}} = \frac{B_{3mi+1} - B_{3mi}}{B_{3mi}} + \frac{B_{3mi+1}}{B_{3mi}} \frac{\varphi}{\text{tg} \omega t}. \quad (17)$$

Поскольку значение отношения амплитудных величин магнитной индукции  $B_{3mi+1} / B_{3mi}$  близко к единице, то выражение для оценки влияния неоднородности переменного внешнего магнитного поля в рабочем зазоре на стабильность формирования и устойчивое положение цепочек ФМП примет следующий вид:

$$\frac{B_{3vi+1} - B_{3vi}}{B_{3vi}} = \frac{B_{3mi+1} - B_{3mi}}{B_{3mi}} + \frac{\varphi}{\text{tg} \omega t}. \quad (18)$$

Выражение (18) позволяет учитывать амплитудную  $(B_{3mi+1} - B_{3mi}) / B_{3mi}$ , временную или фазовую  $(\varphi / \text{tg} \omega t)$  составляющие (рис. 1, б) индукции внешнего магнитного поля с достаточной точностью.

**Рациональный характер магнитного поля для процесса магнитно-электрического упрочнения.** Для установления влияния амплитудной и фазовой составляющих индукции на силу прижима  $f_{\text{ц}}$  проведены исследования и численный расчет неоднородности переменного внешнего магнитного поля в рабочем зазоре установки МЭУ модели ЭУ-5 при питании электромагнита I-образной конструкции однофазным выпрямленным током по одно- и двухполупериодной схемам силой и напряжением, соответственно изменяемыми в пределах 3–5 А и 12–36 В. Эксперименты по измерению амплитудного значения индукции в рабочем зазоре выполнялись с помощью тесламетра ТИ-10 (погрешность измерения не более 2,5 %) со специальными датчиками Холла. Величина фазового сдвига магнитного потока в различных точках рабочего зазора определялась путем измерения линейной развертки при подаче напряжений на входы каналов вертикального отклонения [9] с использованием универсального осциллографа С1-77.

Результаты экспериментальных исследований (табл. 1) показывают, что неоднородность в рабочем зазоре наиболее характерна для переменного внешнего магнитного поля, генерируемого электромагнитом, питаемым однофазным током по однополупериодной схеме. Амплитудная и фазовая составляющие индукции превышают в 2,25–3,0 и 2,25–2,5 раза составляющие неоднородности магнитного поля, формируемого электромагнитом, питаемым однофазным током по

двухполупериодной схеме. Значение постоянной магнитной индукции в 2 раза меньше величины индукции при переменном магнитном поле.

Установлено, что наибольшее влияние на силу прижима цепочки ФМП к обрабатываемой поверхности оказывает фазовая составляющая индукции, с увеличением частоты (100 Гц и более) питания которой ее значение снижается до нуля. При этом гармонический характер изменения величины  $B_{\nu}$ , наиболее выражен для однополупериодной схемы выпрямления и определяет импульсное периодическое воздействие силы прижима  $f_{\text{ц}}$  на цепочки ФМП в рабочем зазоре устройства МЭУ.

Анализ динамики изменения параметров зависимости (17) при их взаимодействии показывает, что переменные составляющие магнитной индукции влияют на силу прижима  $f_{\text{ц}}$  и соответственно на стабильность и устойчивость цепочек ФМП и их электрическую проводимость в точке контакта [10]

$$R_{i(i+1)} = p_f t_f / (\pi r_k^2 f_{\text{ц}}^{0,75}), \quad (19)$$

где  $p_f$  – удельное сопротивление окисной пленки, Ом·м;  $t_f$  – суммарная толщина окисной пленки, м;  $r_k$  – радиус зоны контакта, м.

Для исследования интенсивности образования цепочек ФМП под воздействием внешнего магнитного поля установлено, что магнитные поля (частотой 12,5 и 50 Гц) недостаточно однородны (рис. 2, а). Последнее не обеспечивает устойчивого положения цепочек ФМП.

Исследования синхронности следования импульсов напряжений источника питания электромагнита ( $U_{ki}$ ) и источника технологического тока модели Invertec V270 T ( $U_{ti}$ ) в рабочем зазоре установки МЭУ модели ЭУ-5 выполнялись с помощью универсального осциллографа С1-77. По изменению импульсов напряжения источника питания электромагнитов и источника технологического тока инверторного типа модели Invertec V270 T оценивали величину интенсивности образования во времени цепочек ФМП в рабочем зазоре и их участие в электрических разрядах с последующим переносом расплава частиц ФМП на обрабатываемую поверхность. Киносъемка процесса формирования цепочек ФМП и прохождения по ним электрических разрядов выполнялась камерой модели СКС-1М. Питание исследуемых электромагнитных катушек осуществлялось однофазным выпрямленным током по однополупериодной схеме, а также источником, обеспечивающим прямоугольные импульсы с частотой 12,5 Гц.

Результаты осциллографических исследований показывают, что синхронность следования импульсов напряжения источников внешнего магнитного поля и технологического тока в рабочем зазоре затруднена вследствие питания сварочного источника инверторного типа трехфазным током (частота пульсации до 80 кГц), а электромагнитной катушки однофазным током, выпрямленным по одно- и двухполупериодной схемам (частота пульсаций 50 и 12,5 Гц соответственно). Установлено, что для электромагнитной системы источника технологического тока с электромагнитом, питание которого осуществляется выпрямленным током по однополупериодной схеме, в момент паузы тока в катушке электромагнита минимальное значение магнитной индукции не обеспечивает стабильного формирования цепочек ФМП в рабочем зазоре. Вследствие этого электрические разряды отсутствуют, процесс МЭУ протекает неустойчиво с пульсирующим горением цепочек ФМП в рабочем зазоре. Для магнитной системы с электромагнитом, питаемым током с прямоугольными импульсами частотой 12,5 Гц, изменение во времени величины индукции незначительно влияет на интенсивность образования цепочек ФМП в рабочем

Т а б л и ц а 1. Результаты исследования неоднородности внешнего магнитного поля в рабочем зазоре устройства МЭУ

Схема питания источника магнитного поля	Среднее значение величины магнитной индукции, Тл		Фазовый сдвиг, рад	Неоднородность магнитного поля, %	
	амплитудная	постоянная		амплитудная	фазовая
Однополупериодная	0,75	0,32	$(5-7) \cdot 10^{-3}$	6–9	18–25
Двухполупериодная	0,78	0,63	$(3-4) \cdot 10^{-3}$	2–4	8–10

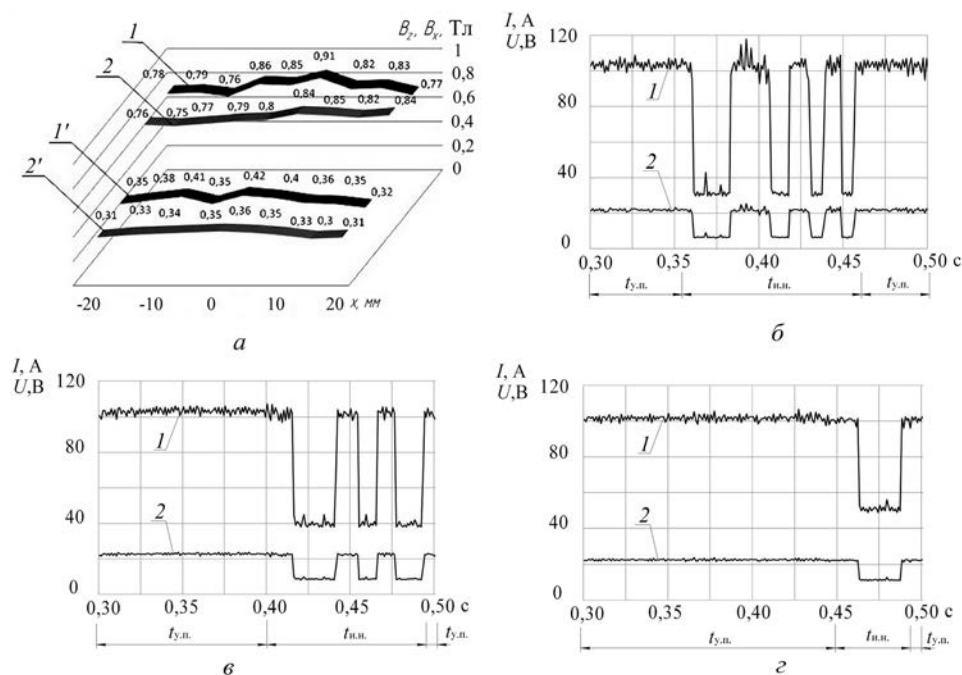


Рис. 2. Диаграммы распределения в рабочем зазоре продольной  $B_z$  (1, 2) и поперечной  $B_x$  (1', 2') составляющих магнитной индукции в рабочем зазоре при частотах 50 (1, 1') и 12,5 Гц (2, 2') (а), осциллограммы технологического тока (1) и напряжения (2) (б, в, з);  $t_{y.n.}$  – участок установившегося процесса МЭУ;  $t_{н.н.}$  – участок импульсной нестабильности процесса МЭУ

зазоре и перенос расплава на поверхность детали. Это объясняется небольшой пульсацией напряжения источника питания внешнего магнитного поля.

Анализ кинограмм следования электрических разрядов в рабочем зазоре в процессе МЭУ показал, что частота повторяемости участков импульсной нестабильности процесса наплавки в 2,2–2,85 раза меньше для источника технологического тока и электромагнита, питаемого напряжением частотой 12,5 Гц. Это связано с меньшими значениями переменных составляющих магнитной индукции в рабочем зазоре и обеспечивает более устойчивое положение цепочек ФМП, стабильное формирование и развитие электрических разрядов.

Для определения зависимости сплошности покрытий  $G$  от величины магнитной индукции  $B$  в рабочем зазоре и плотности разрядного тока проведены экспериментальные исследования.

Оправка с образцами из стали 45 с наружным диаметром 40 мм, внутренним диаметром 16 мм и толщиной 10 мм устанавливалась в патрон установки. В момент начала вращения образцов из контейнера в рабочий зазор одновременно подавались ферромагнитный порошок Fe–2%V и смазочно-охлаждающая жидкость (эмульсол Э-2Б), включался источник технологического тока.

Независимыми переменными были технологические факторы – величина магнитной индукции в рабочем зазоре  $X_1$  ( $B_{3c}$ ) и плотность разрядного тока  $X_2$  ( $i$ ), оказывающие основное влияние на значение магнитно- и электродинамических сил, действующих на частицы ФМП в рабочем зазоре [11].

Постоянными факторами приняты следующие: рабочий зазор  $\delta = 2,0$  мм; размер частиц ФМП  $\Delta = 240\text{--}320$  мкм; скорость вращения образцов  $V = 0,05$  м/с; расход ФМП  $q = 2,8 \cdot 10^{-3}$  г/(с·мм<sup>2</sup>); расход рабочей жидкости  $q = 2,0 \cdot 10^{-3}$  дм<sup>3</sup>/(с·мм<sup>2</sup>); длина  $R_{п.}$ , высота рабочего торца  $h$  и угол охвата полюсного наконечника  $\alpha$  соответственно 15 мм, 5,7 мм и 12 град; ферромагнитный порошок Fe–2%V ГОСТ 9849–86; форма постоянного магнита прямоугольная с габаритными размерами 100×80×40 мм, материал ЮНДК18. Значения величины магнитной индукции в рабочем зазоре обеспечивались изменением расстояния между магнитотвердым материалом и образцами посредством перемещения постоянного магнита по направляющим пазам сердечника с полюсным наконечником.

Обработка результатов экспериментов, полученных по матрице центрального композиционного рототабельного равномер-плана второго порядка, с использованием стандартного пакета Excel Microsoft Office позволила получить математико-статистическую модель в нормированном виде, определяющую зависимость сплошности покрытий  $G$  от основных характеристик магнитного и электрического полей  $B_{zc}$  и  $i$ :

$$Y = 90,990 + 6,286 \cdot X_1 + 4,245 \cdot X_2 - 2,417 \cdot X_1 \cdot X_2 - 2,366 \cdot X_1^2 - 0,573 \cdot X_2^2. \quad (20)$$

Выявлено, что все коэффициенты регрессии (20) значимы с 95%-ной доверительной вероятностью по критерию Стьюдента. Также установлено, что статистическая модель адекватна при 5%-ном уровне значимости по критерию Фишера.

Графическое отображение модели (20) представлено одномерными сечениями функции отклика  $Y$  в двумерной системе координат (рис. 3). Анализ модели (20) позволил определить степень влияния технологических факторов на сплошность покрытий и расположить их в порядке убывания значимости:  $G: B_{zc} \rightarrow i$ .

На основе анализа зависимостей (рис. 3) можно сделать вывод, что для магнитной индукции в рабочем зазоре  $B_{zc}$  и плотности разрядного тока  $i$  рациональными являются диапазоны, при которых удовлетворяются следующие условия:  $0,65 < B_{zc} < 0,75$  Тл и  $1,80 < i < 1,95$  А/мм<sup>2</sup>.

Анализ результатов осциллографирования (рис. 2, б) показывает, что для процесса МЭУ характерно преобладание участков импульсной нестабильности, имеющих диапазон изменения разрядного тока 30–118 А (относительное отклонение тока 74,6 %). Для периодов стабильного процесса наплавки отклонение силы разрядного тока от среднего значения составляет 12 А (значения коэффициентов вариации плотности тока  $k_{vi} = 39,3$  % и сплошности покрытий  $k_{vG} = 21,4$  %).

Установлено, что повторяемость периодов стабильного процесса МЭУ и участков импульсной нестабильности одинаковая (рис. 2, в). При этом сила разрядного тока изменяется для участков импульсной нестабильности в пределах 38–102 А (относительное отклонение тока 62,7 %), для периодов стабильного процесса МЭУ отклонение силы разрядного тока от среднего значения составляет 8 А. Величины коэффициентов вариации плотности тока  $k_{vi}$  и сплошности  $k_{vG}$  покрытий соответственно составляют 26,1 и 11,4 %.

В результате ранее принятых технологических ограничений и численного расчета с помощью математического пакета MathCAD определены величины магнитной индукции в рабочем зазоре и плотности разрядного тока. Результаты выполненных расчетов показывают, что при  $B_{zc} = 0,7$  Тл,  $i = 1,95$  А/мм<sup>2</sup> обеспечивается наибольшая сплошность покрытий, равная, 95,1 %. Процесс МЭУ протекает стабильно с формированием покрытия, состоящего из плотно расположенных точечных капель расплава. Анализ результатов осциллографирования (рис. 2, з) показывает, что для МЭУ характерно преобладание периодов стабильного процесса, для которых отклонение силы разрядного тока от среднего значения составляет 5 А. На участках импульсной нестабильности сила разрядного тока изменяется в пределах 49–101 А (относительное отклонение тока 51,5 %).

На основании выполненных экспериментальных исследований установлено, что максимальная сплошность покрытий ( $G = 95,1$  %) обеспечивается при величине магнитной индукции в рабочем зазоре  $B_{zc} = 0,7$  Тл и плотности разрядного тока  $i = 1,95$  А/мм<sup>2</sup>. Установлено, что высокую стабильность процесса МЭУ и высокое качество покрытия (значения коэффициентов вариации плотности тока  $k_{vi} = 26,1$  % и сплошности покрытий  $k_{vG} = 11,4$  %) обеспечивают магнитотвердые материалы с рабочим зазором 2,0 мм, высотой рабочего торца полюсного наконечника 5,7 мм и углом охвата 12 град.

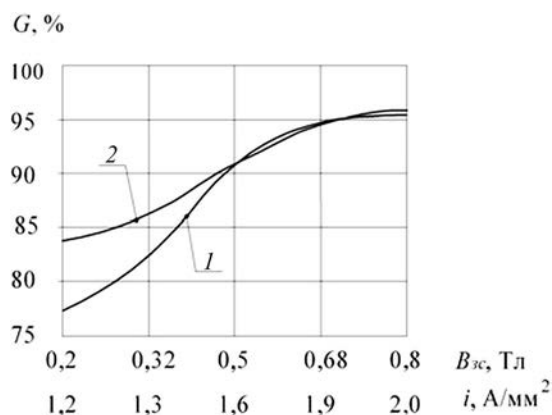


Рис. 3. Зависимость сплошности покрытий  $G$  от величины магнитной индукции  $I$  в рабочем зазоре и плотности разрядного тока 2

Результаты исследований показывают, что стабильность процесса магнитно-электрического упрочнения обеспечивается применением постоянного магнита.

**Рациональный характер магнитного поля для процесса магнитно-абразивной обработки.** В процессе MAO ферроабразивная щетка теряет свою режущую способность в результате затупления частиц ФАП и выкрашивания абразивной составляющей.

При магнитно-абразивной обработке неоднородность магнитного поля в рабочем зазоре оказывает положительный эффект на процесс самоорганизации ферроабразивной щетки. В результате явлений самоорганизации частиц ФАП обработка поверхностей деталей производится постоянно обновляющимися острыми кромками, т. е. на протяжении всего цикла имеет место процесс ориентированного абразивного резания, что в свою очередь увеличивает производительность обработки и качество обработанного поверхностного слоя.

По мере засаливания продуктами микрорезания и в результате уплотнения цепочек ФАП (рис. 4, а) процесс самоорганизации ферроабразивной щетки становится невозможным. Возникает необходимость регенерации ферроабразивной щетки с целью интенсификации MAO.

Использование установки для MAO с основной и дополнительной магнитными системами (рис. 4, б) с их поочередным включением позволяет восстанавливать режущую способность ферроабразивной щетки за счет перемешивания ФАП в рабочем зазоре.

Установка для MAO содержит основную магнитную систему, состоящую из катушек индуктивности 1, магнитопровода 3, полюсных наконечников 2 и источника питания (на рис. 4, б не показан). Дополнительная магнитная система состоит из катушки индуктивности 4, полюсного наконечника 5 и источника питания (на рис. 4, б не показан). Магнитопровод у основной и дополнительной систем общий. Обрабатываемая деталь 6 находится между полюсами основной магнитной системы. Полюсный наконечник дополнительной магнитной системы установлен под углом  $90^\circ$  к полюсным наконечникам основной магнитной системы.

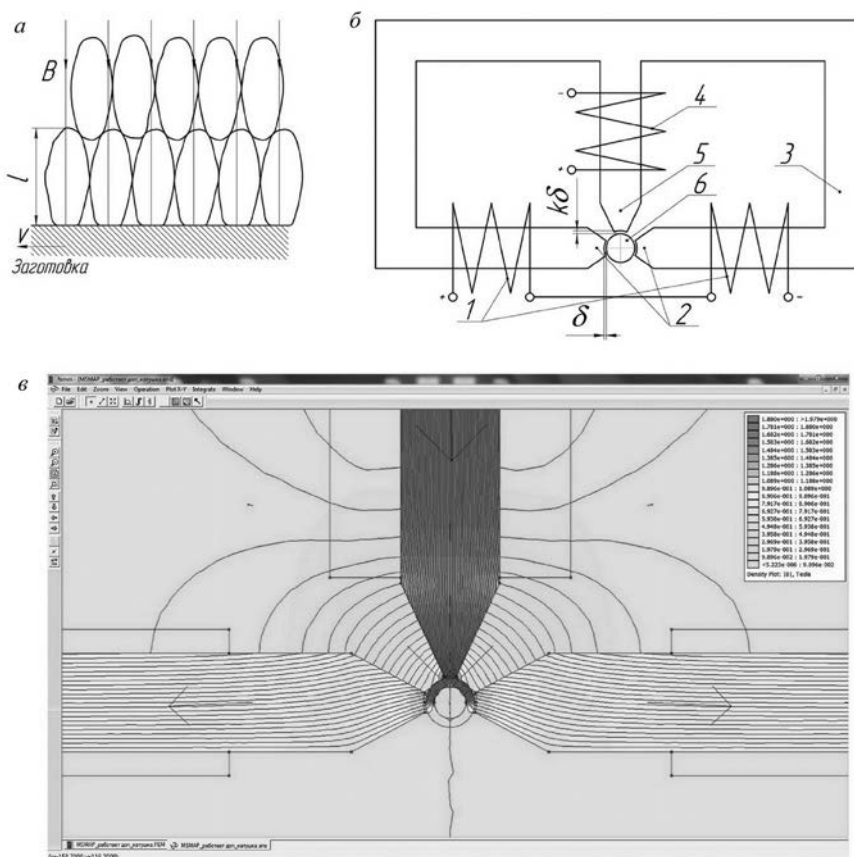


Рис. 4. Картина уплотнения частиц ферроабразивной щетки (а), схема установки MAO с дополнительной магнитной системой (б), топография магнитного поля при работе дополнительной магнитной системы (в) ( $V$  – скорость вращения заготовки,  $l$  – длина наибольшей оси ферроабразивной частицы)

Т а б л и ц а 2. Результаты эксперимента

№ образца	Условия регенерации	$Ra$ до МАО, мкм	$Ra$ после МАО, мкм	$Q$ , мг
1	Без регенерации	1,14	0,51	80
2	Без регенерации	1,25	0,80	20
3	Регенерация 20×2	1,03	0,50	70

Рабочие зазоры  $\delta$  между полюсами основной магнитной системы и обрабатываемой деталью заполняются порцией ФАП.

Установка работает следующим образом: порция ферроабразивного порошка прижимается к обрабатываемой поверхности нормальной силой резания, обусловленной магнитным полем ( $B_v = 0,9$  Тл) основной магнитной системы, производится обработка поверхности детали на протяжении времени  $t_0$ . Затем производится отключение подачи напряжения на катушки основной магнитной системы и включение на катушку дополнительной магнитной системы на время  $t_d$ , при этом наблюдается перемещение порции порошка из рабочего зазора основной магнитной системы в зазор  $k\delta$  (коэффициент  $k = 1,5-2,0$ ) дополнительной магнитной системы.

При работе дополнительной катушки в рабочем зазоре  $k\delta$  наводится электромагнитная индукция, равная  $B_v = 1,9$  Тл, и обрабатываемая заготовка подвергается кратковременному воздействию мощного магнитного поля. Топография магнитного поля при работе дополнительной магнитной системы получена в программе Femm 4.2 (рис. 4, в). Затем дополнительная система отключается и включается основная система. Во время переключения систем происходят перемещение порции ФАП из одного рабочего зазора в другой и его перемешивание. В результате чего осуществляется процесс переориентирования ферроабразивных частиц большей осью вдоль силовых линий магнитного поля, что является затруднительным во время постоянной работы магнитов из-за высокой плотности ферроабразивных частиц в рабочем зазоре.

Регенерация режущей способности ферроабразивной щетки поочередным включением основной и дополнительной магнитных систем позволяет интенсифицировать процесс МАО.

В ходе эксперимента на модернизированной установке ЭУ-6 установлено положительное влияние дополнительной магнитной системы на производительность МАО. Результаты эксперимента приведены в табл. 2.

Условия проведения эксперимента: магнитная индукция основной магнитной системы  $B_{ov} = 0,9$  Тл; магнитная индукция дополнительной магнитной системы  $B_{dv} = 1,5$  Тл; рабочий зазор основной магнитной системы  $\delta_0 = 1$  мм; рабочий зазор дополнительной магнитной системы  $\delta_d = 1,7$  мм; зернистость ферроабразивного порошка FeTiC  $\Delta = + 200-315$  мкм; время обработки  $\tau_0 = 90$  с; скорость главного движения  $V = 0,9$  м/с; интервал включения дополнительной магнитной системы  $u = 20$  с; продолжительность цикла работы дополнительной магнитной системы  $\tau_d = 2$  с. Образцами служили поршневые пальцы ( $Ddl = 25 \cdot 16 \cdot 66$  мм, материал – сталь 15Х, твердость поверхностного слоя 58–62 HRC). **Выходные показатели:** достигаемая шероховатость поверхности деталей  $Ra$ , мкм; массовый съем металла  $Q$ , мг. Измерение как исходной, так и достигаемой шероховатости поверхности производилось на профилографе-профилометре Mitutoyo SJ-201P. Детали взвешивались на весах Massa-K BK-600 с точностью до 0,01 г.

Все образцы обрабатывались одной порцией порошка, смена образцов производилась без отключения напряжения на катушках основной магнитной системы, при этом не разрушалась ферроабразивная щетка. Образцы № 1, № 2 обрабатывались без регенерации ферроабразивной щетки. Обработка образца № 3 выполнялась с регенерацией ферроабразивной щетки (через каждые 20 с отключалась основная магнитная система и включалась на 2 с дополнительная,  $B_{dv} = 1,5$  Тл).

### Выводы

1. Теоретически и экспериментально установлено влияние характера внешнего магнитного поля на изменение во времени величин силы прижима  $f_{ц}$  частиц ферромагнитного порошка к обрабатываемой поверхности детали при магнитно-электрическом упрочнении и магнитно-абразивной обработке.

2. Экспериментально установлено, что наибольшую стабильность процесса МЭУ обеспечивают постоянные магниты с величиной индукции, равной 0,7 Тл, в рабочем зазоре 2,0 мм при высоте полюсного наконечника 5,7 мм и угле охвата 12°.

3. В ходе эксперимента выявлено, что дополнительная магнитная система, расположенная под углом 90° к основной, повысила производительность магнитно-абразивной обработки в 3,5 раза, что позволяет обрабатывать большее количество деталей одной порцией порошка без потери качества.

### Список использованной литературы

1. Кингсеп, А. С. Основы физики. Курс общей физики: учебник в 2 т. Т. 1. Механика, электричество и магнетизм, колебания и волны, волновая оптика / А. С. Кингсеп, Г. Р. Локшин, О. А. Ольхов. – М. : Физматлит, 2001. 560 с.
2. Яковлев, В. И. Классическая электродинамика: учеб. пособие. Ч. 1. Электричество и магнетизм. – Новосибирск: Новосиб. гос. ун-т, 2003. 267 с.
3. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика: учеб. пособие для студентов вузов ; в 10 т. Т. VIII. Электродинамика сплошных сред. / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : Наука, 2005. 656 с.
4. Юдаев, Б. Н. Техническая термодинамика. Теплопередача : учебник / Б. Н. Юдаев. – М. : Высшая школа, 1988. 479 с.
5. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле / Л. А. Бессонов. – М. : Гардарики, 2001. 317 с.
6. Борисов, Ю. М. Электротехника: учебник для вузов / Ю. М. Борисов, Д. Н. Липатов, Ю. Н. Зорин. – М. : Энергоатомиздат, 1985. 552 с.
7. Башарин, С. А. Теоретические основы электротехники: Теория электрических цепей и электромагнитного поля : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / С. А. Башарин, В. В. Федоров. – М. : Изд. центр «Академия», 2004. 304 с.
8. Герасимов, В. Г. Электротехнический справочник: в 4 т. Т. 2. Электротехнические изделия и устройства / под общ. ред. В. Г. Герасимова [и др.]. – Изд-во МЭИ, 2003. 518 с.
9. Метрология и радиоизмерения: учебник для вузов / В. И. Нефедов и [др.]; под ред. В.И. Нефедова. – 2-е изд., перераб. – М. : Высшая школа, 2006. 526 с.
10. Акулович, Л. М. Термомеханическое упрочнение деталей в электромагнитном поле. – Полоцк : ПГУ, 1999. 240 с.
11. Ракомсин, А. П. Упрочнение и восстановление изделий в электромагнитном поле / А. П. Ракомсин; под общ. ред. П. А. Витязя. – Минск: Парадокс, 2000.

### References

1. Kingsep, A. S., Lokshin, G. R. and Ol'khov, O. A. (2001), *Osnovy fiziki. Kurs obshchei fiziki: uchebnik v 2 t. T. 1. Mekhanika, elektrichestvo i magnetizm, kolebaniya i volny, volnovaya optika* [Fundamentals of Physics. The course of general physics. A tutorial in 2 volumes, vol. 1. Mechanics, electricity and magnetism, vibration and waves, wave optics], Fizmatlit, Moscow, RU.
2. Yakovlev, V. I. (2003), *Klassicheskaya elektrodinamika: ucheb. posobie. Ch. 1. Elektrichestvo i magnetizm* [Electrodynamics: a tutorial, part 1. Electricity and Magnetism], Novosib. gos. un-t, Novosibirsk, RU.
3. Landau, L. D. and Lifshits, E. M. (2001), *Teoreticheskaya fizika: ucheb. posobie dlya studentov vuzov, v 10 t. T. 8. Elektrodinamika sploshnykh sred* [Theoretical physics: a textbook for students; 10 volumes, vol. VIII. Electrodynamics of Continuous Media], Nauka, Moscow, RU.
4. Yudaev, B. N. (1988), *Tekhnicheskaya termodinamika. Teploperedacha: uchebnik* [Engineering Thermodynamics. Heat transfer: a textbook], Vysshaya shkola, Moscow, RU.
5. Bessonov, L. A. (2001), *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Elektromagnitnoe pole* [Theoretical Foundations of Electrical Engineering. Electromagnetic field], Gardariki, Moscow, RU.
6. Borisov, Yu. M., Lipatov, D. N. and Zorin, YU. N. (1985), *Elektrotekhnika: uchebnik dlya vuzov* [Electrical engineering: a textbook for universities], Energoatomizdat, Moscow, RU.
7. Basharin, S. A. and Fedorov, V. V. (2004), *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki: Teoriya elektricheskikh tsepei i elektromagnitnogo polya: ucheb. posobie dlya stud. vyssh. ucheb. Zavedenii* [Theoretical foundations of electrical engineering: Electrical circuits and electromagnetic field theory: a textbook for university students], Izd. tsentr «Akademiya», Moscow, RU.
8. Gerasimov, V. G., D'yakov, A. F., Il'inskii, N. F., Labuntsov, V. A., Morozkin, V. P., Orlov, I. N., Popov, A. I. and Stroeve, V. A. (2003), *Elektrotekhnicheskii spravochnik: v 4 t. T. 2. Elektrotekhnicheskie izdeliya i ustroystva* [Electrical engineering reference book: 4 volumes, vol. 2. Electrotechnical products and devices], Izd-vo MEI, Moscow, RU.
9. Nefodov, V. I., Khakhin, V. I. and Bitjukov, V. K. (2006), *Metrologiya i radioizmereniya: uchebnik dlya vuzov* [Metrology and radio measurements: a textbook for universities], Vysshaya shkola, Moscow, RU.
10. Akulovich, L. M. (1999), *Termomekhanicheskoe uprochnenie detalei v elektromagnitnom pole* [Thermomechanical detail hardening in the electromagnetic field], PGU, Polotsk, BY.
11. Rakomsin A. P. (2000), *Uprochnenie i vosstanovlenie izdelii v elektromagnitnom pole* [Hardening and restoration items in the electromagnetic field], in Vityaz', P. A. (ed.), *Paradoks*, Minsk, BY.

### Информация об авторах

*Акулович Леонид Михайлович* – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология металлов». Белорусский государственный аграрный технический университет (220023, г. Минск, проспект Независимости, 99, Беларусь). E-mail: [leo-akulovich@yandex.ru](mailto:leo-akulovich@yandex.ru)

*Миранович Алексей Валерьевич* – кандидат технических наук, декан факультета «Технический сервис в АПК». Белорусский государственный аграрный технический университет (220023, г. Минск, проспект Независимости, 99, Беларусь). E-mail: [miron23@tut.by](mailto:miron23@tut.by)

*Ворошуха Олег Николаевич* – ассистент кафедры «Технология металлов». Белорусский государственный аграрный технический университет (220023, г. Минск, проспект Независимости, 99, Беларусь). E-mail: [voro-shuho@tut.by](mailto:voro-shuho@tut.by)

### Для цитирования

Акулович, Л. М. Управление обработкой поверхностей деталей машин в процессах магнитно-электрического упрочнения и магнитно-абразивной обработки / Л. М. Акулович, А. В. Миранович, О. Н. Ворошуха // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2016. – № 4. – С. 37–48.

### Information about the authors

*Akulovich Leonid Mikhailovich* – D. Sc. (Engineering), Professor, Professor, the Department “Metal Technology”. Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosti Ave., 220023, Minsk, Belarus). E-mail: [leo-akulovich@yandex.ru](mailto:leo-akulovich@yandex.ru)

*Miranovich Alexey Valerievich* – Ph. D. (Engineering), Dean of the faculty “Technical service in the agro-industrial complex”. Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosti Ave., 220023, Minsk, Belarus). E-mail: [miron23@tut.by](mailto:miron23@tut.by)

*Voroshuho Oleg Nikolaevich* – assistant of the Department “Metal Technology”. Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosti Ave., 220023, Minsk, Belarus). E-mail: [voro-shuho@tut.by](mailto:voro-shuho@tut.by)

### For citation

Akulovich L. M., Miranovich A. V., Voroshuho O. N. Control of machine components surfacing during magnetic-electric hardening and magnetic-abrasive machining. Proceeding of the National academy of sciences of Belarus, physical-technical series. 2016, no. 4, pp. 37–48.



**В. С. Кончак<sup>1</sup>, А. А. Назаренко<sup>2</sup>**<sup>1</sup>*Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Беларусь,*  
<sup>2</sup>*Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси, Минск, Беларусь***МЕТОДИКА ПОДГОТОВКИ МНОГОМАССОВЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ  
К ВЕРИФИКАЦИИ**

Разработаны методы идентификации параметров математических моделей по результатам стендовых и натурных испытаний механических конструкций. Исходными данными для вычисления параметров дифференциальных уравнений, описывающих динамику колебаний многомассовых моделей, являются измеренные в ходе эксперимента функции перемещения и нагружения. Получены формулы для вычисления коэффициентов упругих и демпфирующих элементов, объединяющих колеблющиеся массы в единый механизм. Результаты работы могут быть использованы при моделировании многомассовых колебательных систем, работающих в режиме свободных колебаний или с закрепленными граничными элементами.

*Ключевые слова:* модели механических конструкций, идентификация, верификация, линеаризация модели, гармоническая аппроксимация.

**V. S. Konchak<sup>1</sup>, A. A. Nazarenko<sup>2</sup>**<sup>1</sup>*The Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,*  
<sup>2</sup>*The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus Minsk, Belarus***A METHOD FOR PREPARATION OF MULTIMASS COMPUTER MODELS  
FOR VERIFICATION PROCEDURE**

Coefficients calculation methods for systems of differential equations are developed. These coefficients are calculated by the results of multimass model elements displacement function and loading function measurements obtained during bench tests. The obtained results can be used for verification of complex mechanical systems, models and finite element models of rod structures.

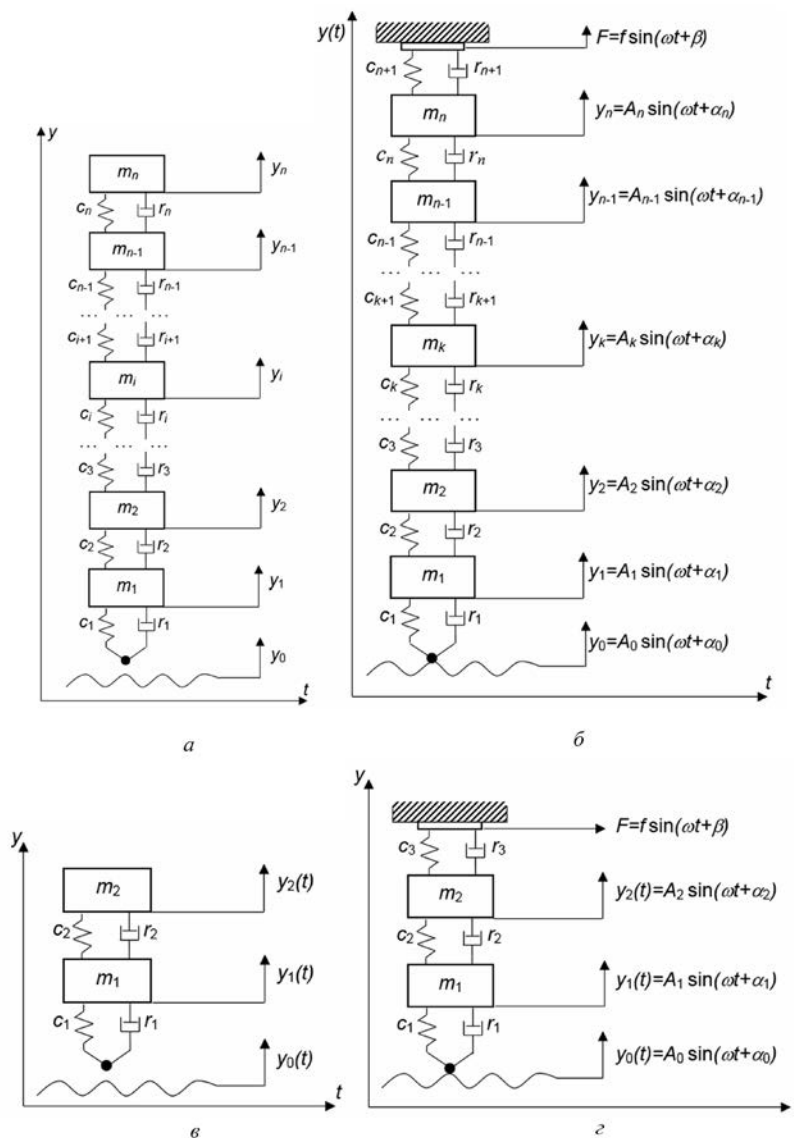
*Keywords:* mechanical structures models, identification, verification, model linearization, harmonic approximation.

**Введение.** Проектирование объектов новой техники связано с необходимостью исследования их опытных образцов на соответствие техническому заданию, что требует проведения больших объемов дорогостоящих испытаний узлов, агрегатов и изделия в целом.

Использование компьютерных технологий позволяет заменить реальные испытания виртуальными, которые проводят на моделях исследуемых конструкций. Однако такие модели должны быть адекватными реальным объектам, т. е. отражать их физические и механические свойства. Для этого применяют методы верификации, благодаря которым результаты виртуальных испытаний с заданной точностью совпадут с реальными данными. Расчетным путем удастся исследовать на модели степень нагруженности узлов проектируемого изделия, уровни колебания конструктивных элементов и другие свойства, характеризующие качество функционирования разрабатываемого образца.

Цель настоящей статьи – разработка методов вычисления параметров математических моделей по результатам измерения реальных физических реакций, возникающих в конструкциях под нагрузкой. Рассматриваются два типа многомассовых моделей – модель, функционирующая в режиме свободных колебаний (рисунки, а), и модель, у которой граничная масса закреплена и измерена ее реакция на приложенную силу (рисунки, б). Разработан алгоритм вычисления коэффициентов уравнений как результат последовательного их решения.

**Математическое обоснование алгоритма обработки экспериментальной информации, полученной при исследовании многомассовой колебательной системы.** Динамическая модель упругого механизма – совокупность сосредоточенных масс, соединенных между собой упругим и демпфирующим безынерционными элементами. Силы в таких моделях обычно имеют



Структурныя схемы многамасовых (а, б) і двухмасовых (в, г) моделаў со свабоднымі кіслібамі гранічнай масы (а, в), з замацаваннем гранічнай масы (б, г)

детерминированный характер, а весь объект ввиду данного выше определения является единой упругой системой, для теоретического описания которой используются математические методы теории колебаний. Элементы механизма во время работы совершают сложные колебания. Представляет интерес относительное перемещение элементов, соединенных кинематически в много-массовую систему. Такая простейшая система изображена на рисунке а.

Динамика взаимных колебаний отдельных элементов такого объекта описывается системой дифференциальных уравнений [1, 2]

$$\left\{ \begin{array}{l} m_1 \ddot{y}_1 + r_1 \dot{y}_1 + c_1 y_1 - r_2 (\dot{y}_2 - \dot{y}_1) - c_2 (y_2 - y_1) = r_1 \dot{y}_0 + c_1 y_0, \\ m_2 \ddot{y}_2 + r_2 (\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + c_2 (y_2 - y_1) - r_3 (\dot{y}_3 - \dot{y}_2) - c_3 (y_3 - y_2) = 0, \\ \dots \dots \dots \\ m_i \ddot{y}_i + r_i (\dot{y}_i - \dot{y}_{i-1}) + c_i (y_i - y_{i-1}) - r_{i+1} (\dot{y}_{i+1} - \dot{y}_i) - c_{i+1} (y_{i+1} - y_i) = 0, \\ \dots \dots \dots \\ m_{n-1} \ddot{y}_{n-1} + r_{n-1} (\dot{y}_{n-1} - \dot{y}_{n-2}) + c_{n-1} (y_{n-1} - y_{n-2}) - r_n (\dot{y}_n - \dot{y}_{n-1}) - c_n (y_n - y_{n-1}) = 0, \\ m_n \ddot{y}_n + r_n (\dot{y}_n - \dot{y}_{n-1}) + c_n (y_n - y_{n-1}) = 0. \end{array} \right. \quad (1)$$

В практике машиностроения такие динамические объекты встречаются довольно часто. Примером может служить система для моделирования крутильных колебаний валов [3, 4], приведенных систем поддрессоривания элементов автомобильных конструкций [5] и других агрегатов, работающих под воздействием переменных нагрузок.

Рассмотрим простейшую систему, описывающую взаимодействие двух колеблющихся масс [6], первая передвигается под воздействием вынуждающих факторов, а вторая – от взаимодействия через упругий и демпфирующий элементы с первой. Схематическое представление такой системы приведено на рисунке 6, ее уравнения движения запишем как

$$\begin{cases} m_1 \ddot{y}_1 + r_1 \dot{y}_1 + c_1 y_1 - r_2 (\dot{y}_2 - \dot{y}_1) - c_2 (y_2 - y_1) = F_{\text{вын}}, \\ m_2 \ddot{y}_2 + r_2 (\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + c_2 (y_2 - y_1) = 0, \end{cases} \quad (2)$$

а уравнение вынуждающей силы, задающей колебания массы  $m_1$ , представим таким образом:

$$F_{\text{вын}} = r_1 \dot{y}_0 + c_1 y_0. \quad (3)$$

Так как сила, вынуждающая движение массы  $m_1$ , порождена функцией перемещения

$$y_0 = A_0 \sin(\omega t + \alpha_0), \quad (4)$$

то, учитывая линейный характер системы (2), обе функции перемещения масс  $m_1$  и  $m_2$  будут в этом случае гармоническими:

$$y_1 = A_1 \sin(\omega t + \alpha_1), \quad y_2 = A_2 \sin(\omega t + \alpha_2). \quad (5)$$

В результате подстановки в уравнения (2) функций (3)–(5) и их производных получим систему тождеств

$$\begin{cases} -m_1 \omega^2 A_1 \sin(\omega t + \alpha_1) + r_1 \omega A_1 \cos(\omega t + \alpha_1) + c_1 A_1 \sin(\omega t + \alpha_1) - \\ -r_2 \omega A_2 \cos(\omega t + \alpha_2) + r_2 \omega A_1 \cos(\omega t + \alpha_1) - c_2 A_2 \sin(\omega t + \alpha_2) + \\ + c_2 A_1 \sin(\omega t + \alpha_1) = r_1 \omega A_0 \cos(\omega t + \alpha_0) + c_1 A_0 \sin(\omega t + \alpha_0), \\ -m_2 \omega^2 A_2 \sin(\omega t + \alpha_2) + r_2 \omega A_2 \cos(\omega t + \alpha_2) - r_2 \omega A_1 \cos(\omega t + \alpha_1) + \\ + c_2 A_2 \sin(\omega t + \alpha_2) - c_2 A_1 \sin(\omega t + \alpha_1) = 0. \end{cases}$$

Выполним тригонометрические преобразования, тогда

$$\begin{cases} -m_1 \omega^2 A_1 (\sin \omega t \cos \alpha_1 + \cos \omega t \sin \alpha_1) + r_1 \omega A_1 (\cos \omega t \cos \alpha_1 - \\ - \sin \omega t \sin \alpha_1) + c_1 A_1 (\sin \omega t \cos \alpha_1 + \cos \omega t \sin \alpha_1) - \\ -r_2 \omega A_2 (\cos \omega t \cos \alpha_2 - \sin \omega t \sin \alpha_2) + r_2 \omega A_1 (\cos \omega t \cos \alpha_1 - \\ - \sin \omega t \sin \alpha_1) - c_2 A_2 (\sin \omega t \cos \alpha_2 + \cos \omega t \sin \alpha_2) + \\ + c_2 A_1 (\sin \omega t \cos \alpha_1 + \cos \omega t \sin \alpha_1) = r_1 \omega A_0 (\cos \omega t \cos \alpha_0 - \\ - \sin \omega t \sin \alpha_0) + c_1 A_0 (\sin \omega t \cos \alpha_1 + \cos \omega t \sin \alpha_1), \\ -m_2 \omega^2 A_2 (\sin \omega t \cos \alpha_2 + \cos \omega t \sin \alpha_2) + r_2 \omega A_2 (\cos \omega t \cos \alpha_2 - \\ - \sin \omega t \sin \alpha_2) - r_2 \omega A_1 (\cos \omega t \cos \alpha_1 - \sin \omega t \sin \alpha_1) + \\ + c_2 A_2 (\sin \omega t \cos \alpha_2 + \cos \omega t \sin \alpha_2) - c_2 A_1 (\sin \omega t \cos \alpha_1 + \\ + \cos \omega t \sin \alpha_1) = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Поскольку система (6) является тождеством, то каждое из ее уравнений можно разделить на два соотношения, содержащие только функцию  $\sin \omega t$  или  $\cos \omega t$ . В результате получим две системы алгебраических уравнений, у которых неизвестными будут параметры  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $r_1 \omega$  и  $r_2 \omega$  исходной системы дифференциальных уравнений (2). Конкретное их представление будет иметь вид

$$\begin{cases} -m_1\omega^2 A_1 \cos \alpha_1 - r_1\omega A_1 \sin \alpha_1 + c_1 A_1 \cos \alpha_1 + r_2\omega A_2 \sin \alpha_2 - \\ -r_2\omega A_1 \sin \alpha_1 - c_2 A_2 \cos \alpha_2 + c_2 A_1 \cos \alpha_1 = -r_1\omega A_0 \sin \alpha_0 + c_1 A_0 \cos \alpha_0, \\ -m_1\omega^2 A_1 \sin \alpha_1 + r_1\omega A_1 \cos \alpha_1 + c_1 A_1 \sin \alpha_1 - r_2\omega A_2 \cos \alpha_2 + \\ + r_2\omega A_1 \cos \alpha_1 - c_2 A_2 \sin \alpha_2 + c_2 A_1 \sin \alpha_1 = r_1\omega A_0 \cos \alpha_0 + c_1 A_0 \sin \alpha_0, \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} -m_2\omega^2 A_2 \cos \alpha_2 - r_2\omega A_2 \sin \alpha_2 + r_2\omega A_1 \sin \alpha_1 + c_2 A_2 \cos \alpha_2 - c_2 A_1 \cos \alpha_1 = 0, \\ -m_2\omega^2 A_2 \sin \alpha_2 + r_2\omega A_2 \cos \alpha_2 - r_2\omega A_1 \cos \alpha_1 + c_2 A_2 \sin \alpha_2 - c_2 A_1 \sin \alpha_1 = 0. \end{cases} \quad (8)$$

Уравнения (8) являются системой второго порядка с двумя неизвестными. Для решения данной системы перегруппируем ее члены относительно указанных неизвестных  $r_2$  и  $c_2$ :

$$\begin{cases} -r_2\omega(A_2 \sin \alpha_2 - A_1 \sin \alpha_1) + c_2(A_2 \cos \alpha_2 - A_1 \cos \alpha_1) = m_2\omega^2 A_2 \cos \alpha_2, \\ r_2\omega(A_2 \cos \alpha_2 - A_1 \cos \alpha_1) + c_2(A_2 \sin \alpha_2 - A_1 \sin \alpha_1) = m_2\omega^2 A_2 \sin \alpha_2. \end{cases} \quad (9)$$

Решать систему (9) будем методом Крамера. Вычислим определители:

$$\Delta = \begin{pmatrix} -(A_2 \sin \alpha_2 - A_1 \sin \alpha_1) & (A_2 \cos \alpha_2 - A_1 \cos \alpha_1) \\ (A_2 \cos \alpha_2 - A_1 \cos \alpha_1) & (A_2 \sin \alpha_2 - A_1 \sin \alpha_1) \end{pmatrix} = -[A_1^2 + A_2^2 - 2A_1 A_2 \cos(\alpha_2 - \alpha_1)],$$

$$\Delta r = \begin{pmatrix} m_2\omega^2 A_2 \cos \alpha_2 & (A_2 \cos \alpha_2 - A_1 \cos \alpha_1) \\ m_2\omega^2 A_2 \sin \alpha_2 & (A_2 \sin \alpha_2 - A_1 \sin \alpha_1) \end{pmatrix} = m_2\omega^2 A_1 A_2 \sin(\alpha_2 - \alpha_1),$$

$$\Delta c = \begin{pmatrix} -(A_2 \sin \alpha_2 - A_1 \sin \alpha_1) & m_2\omega^2 A_2 \cos \alpha_2 \\ (A_2 \cos \alpha_2 - A_1 \cos \alpha_1) & m_2\omega^2 A_2 \sin \alpha_2 \end{pmatrix} = -m_2\omega^2 (A_2^2 - A_1 A_2 \cos(\alpha_2 - \alpha_1)),$$

тогда

$$r_2 = \frac{m_2\omega^2 A_1 A_2 \sin(\alpha_2 - \alpha_1)}{-[A_2^2 + A_1^2 - 2A_1 A_2 \cos(\alpha_2 - \alpha_1)]\omega}, \quad c_2 = \frac{m_2\omega^2 (A_2^2 - A_1 A_2 \cos(\alpha_2 - \alpha_1))}{A_2^2 + A_1^2 - 2A_1 A_2 \cos(\alpha_2 - \alpha_1)}. \quad (10)$$

Сгруппируем члены уравнений системы (7) относительно неизвестных  $c_1$ ,  $c_2$  и  $r_1$ ,  $r_2$ :

$$\begin{cases} -r_1\omega(A_1 \sin \alpha_1 - A_0 \sin \alpha_0) + c_1(A_1 \cos \alpha_1 - A_0 \cos \alpha_0) + \\ + r_2\omega(A_2 \sin \alpha_2 - A_1 \sin \alpha_1) - c_2(A_2 \cos \alpha_2 - A_1 \cos \alpha_1) = m_1\omega^2 A_1 \cos \alpha_1, \\ r_1\omega(A_1 \cos \alpha_1 - A_0 \cos \alpha_0) + c_1(A_1 \sin \alpha_1 - A_0 \sin \alpha_0) - \\ - r_2\omega(A_2 \cos \alpha_2 - A_1 \cos \alpha_1) - c_2(A_2 \sin \alpha_2 - A_1 \sin \alpha_1) = m_1\omega^2 A_1 \sin \alpha_1. \end{cases} \quad (11)$$

Просуммируем левые и правые части равенств систем (9) и (11). В результате будем иметь систему уравнений для вычисления неизвестных параметров  $r_1$  и  $c_1$ :

$$\begin{cases} -r_1\omega(A_1 \sin \alpha_1 - A_0 \sin \alpha_0) + c_1(A_1 \cos \alpha_1 - A_0 \cos \alpha_0) = m_1\omega^2 A_1 \cos \alpha_1 + m_2\omega^2 A_2 \cos \alpha_2, \\ r_1\omega(A_1 \cos \alpha_1 - A_0 \cos \alpha_0) + c_1(A_1 \sin \alpha_1 - A_0 \sin \alpha_0) = m_1\omega^2 A_1 \sin \alpha_1 + m_2\omega^2 A_2 \sin \alpha_2, \end{cases} \quad (12)$$

которые могут быть получены, как и при решении системы (9):

$$\begin{aligned} r_1 &= \frac{m_1\omega^2 A_1 A_0 \sin(\alpha_1 - \alpha_0)}{[A_1^2 + A_0^2 - 2A_1 A_0 \cos(\alpha_1 - \alpha_0)]\omega} + \frac{m_2\omega^2 [A_2 A_1 \sin(\alpha_2 - \alpha_1) - A_2 A_0 \sin(\alpha_2 - \alpha_0)]}{[A_1^2 + A_0^2 - 2A_1 A_0 \cos(\alpha_1 - \alpha_0)]\omega}, \\ c_1 &= \frac{m_1\omega^2 [A_1^2 - A_1 A_0 \cos(\alpha_1 - \alpha_0)]}{A_1^2 + A_0^2 - 2A_1 A_0 \cos(\alpha_1 - \alpha_0)} + \frac{m_2\omega^2 [A_2 A_1 \cos(\alpha_2 - \alpha_1) - A_2 A_0 \cos(\alpha_2 - \alpha_0)]}{A_1^2 + A_0^2 - 2A_1 A_0 \cos(\alpha_1 - \alpha_0)}. \end{aligned} \quad (13)$$

Для трехмассовой модели система дифференциальных уравнений, описывающих динамику ее колебаний, будет иметь вид

$$\begin{cases} m_1 \ddot{y}_1 + r_1 \dot{y}_1 + c_1 y_1 - r_2 (\dot{y}_2 - \dot{y}_1) - c_2 (y_2 - y_1) = r_1 \dot{y}_0 + c_1 y_0, \\ m_2 \ddot{y}_2 + r_2 (\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + c_2 (y_2 - y_1) - r_3 (\dot{y}_3 - \dot{y}_2) - c_3 (y_3 - y_2) = 0, \\ m_3 \ddot{y}_3 + r_3 (\dot{y}_3 - \dot{y}_2) + c_3 (y_3 - y_2) = 0. \end{cases} \quad (14)$$

В результате подстановки в систему (14) ее решения в виде гармонических функций получим три системы алгебраических уравнений, решением которых и будут неизвестные параметры  $r_i$ ,  $c_i$  (12) ( $i = 1, 2, 3$ ):

$$r_3 = \frac{m_3 \omega^2 A_3 A_2 \sin(\alpha_3 - \alpha_2)}{-[A_3^2 + A_2^2 - 2A_3 A_2 \cos(\alpha_3 - \alpha_2)] \omega}, \quad c_3 = \frac{m_3 \omega^2 (A_3^2 - A_3 A_2 \cos(\alpha_3 - \alpha_2))}{[A_3^2 + A_2^2 - 2A_3 A_2 \cos(\alpha_3 - \alpha_2)]}, \quad (15)$$

$$r_2 = - \left\{ \frac{m_2 \omega^2 A_2 A_1 \sin(\alpha_2 - \alpha_1)}{[A_2^2 + A_1^2 - 2A_2 A_1 \cos(\alpha_2 - \alpha_1)] \omega} + \frac{m_3 \omega^2 [(A_3 A_2 \sin(\alpha_3 - \alpha_2) - A_3 A_1 \sin(\alpha_3 - \alpha_1))]}{[A_2^2 + A_1^2 - 2A_2 A_1 \cos(\alpha_2 - \alpha_1)] \omega}, \right. \\ \left. c_2 = \frac{m_2 \omega^2 [A_2^2 - A_2 A_1 \cos(\alpha_2 - \alpha_1)]}{[A_2^2 + A_1^2 - 2A_2 A_1 \cos(\alpha_2 - \alpha_1)]} - \frac{m_3 \omega^2 [A_3 A_2 \cos(\alpha_3 - \alpha_2) - A_3 A_1 \cos(\alpha_3 - \alpha_1)]}{[A_2^2 + A_1^2 - 2A_2 A_1 \cos(\alpha_2 - \alpha_1)]} \right\}, \quad (16)$$

$$r_1 = - \left\{ \frac{m_1 \omega^2 A_1 A_0 \sin(\alpha_1 - \alpha_0)}{[A_1^2 + A_0^2 - 2A_1 A_0 \cos(\alpha_1 - \alpha_0)] \omega} + \frac{m_2 \omega^2 [A_2 A_1 \sin(\alpha_2 - \alpha_1) - A_2 A_0 \sin(\alpha_2 - \alpha_0)]}{[A_1^2 + A_0^2 - 2A_1 A_0 \cos(\alpha_1 - \alpha_0)] \omega} + \right. \\ \left. + \frac{m_3 \omega^2 [A_3 A_2 \sin(\alpha_3 - \alpha_2) - A_3 A_1 \sin(\alpha_3 - \alpha_1)]}{[A_1^2 + A_0^2 - 2A_1 A_0 \cos(\alpha_1 - \alpha_0)] \omega} \right\}, \\ c_1 = \left\{ \frac{m_1 \omega^2 [A_1^2 - A_1 A_0 \cos(\alpha_1 - \alpha_0)]}{[A_1^2 + A_0^2 - 2A_1 A_0 \cos(\alpha_1 - \alpha_0)]} + \frac{m_2 \omega^2 [A_2 A_1 \cos(\alpha_2 - \alpha_1) - A_2 A_0 \cos(\alpha_2 - \alpha_0)]}{[A_1^2 + A_0^2 - 2A_1 A_0 \cos(\alpha_1 - \alpha_0)]} + \right. \\ \left. + \frac{m_3 \omega^2 [A_3 A_2 \cos(\alpha_3 - \alpha_2) - A_3 A_1 \cos(\alpha_3 - \alpha_1)]}{[A_1^2 + A_0^2 - 2A_1 A_0 \cos(\alpha_1 - \alpha_0)]} \right\}. \quad (17)$$

Для многомассовой модели, обобщенная схема которой приведена на рисунке *a*, при тестировании ее в условиях стендовых испытаний гармонической функцией с частотой  $\omega$  формулы для вычисления коэффициентов  $r_k$  и  $c_k$  будут иметь следующий вид:

$$r_1 = - \frac{1}{\omega} \left\{ \frac{m_1 \omega^2 A_1 [A_1 \sin(\alpha_1 - \alpha_1) - A_0 \sin(\alpha_1 - \alpha_0)]}{A_1^2 + A_0^2 - 2A_1 A_0 \cos(\alpha_1 - \alpha_0)} + \right. \\ \left. + \frac{m_2 \omega^2 A_2 [A_1 \sin(\alpha_2 - \alpha_1) - A_0 \sin(\alpha_2 - \alpha_0)]}{A_1^2 + A_0^2 - 2A_1 A_0 \cos(\alpha_1 - \alpha_0)} + \dots + \right. \\ \left. + \frac{m_i \omega^2 A_i [A_1 \sin(\alpha_i - \alpha_1) - A_0 \sin(\alpha_i - \alpha_0)]}{A_1^2 + A_0^2 - 2A_1 A_0 \cos(\alpha_1 - \alpha_0)} + \dots + \right. \\ \left. + \frac{m_n \omega^2 A_n [A_1 \sin(\alpha_n - \alpha_1) - A_0 \sin(\alpha_n - \alpha_0)]}{A_1^2 + A_0^2 - 2A_1 A_0 \cos(\alpha_1 - \alpha_0)} \right\},$$

$$\begin{aligned}
 c_1 &= \left\{ \frac{m_1 \omega^2 A_1 [A_1 \cos(\alpha_1 - \alpha_1) - A_0 \cos(\alpha_1 - \alpha_0)]}{[A_1^2 + A_0^2 - 2A_1 A_0 \cos(\alpha_1 - \alpha_0)]} + \right. & (18) \\
 &+ \frac{m_2 \omega^2 A_2 [A_1 \cos(\alpha_2 - \alpha_1) - A_0 \cos(\alpha_2 - \alpha_0)]}{A_1^2 + A_0^2 - 2A_1 A_0 \cos(\alpha_1 - \alpha_0)} + \dots + \\
 &+ \frac{m_i \omega^2 A_i [A_1 \cos(\alpha_i - \alpha_1) - A_0 \cos(\alpha_i - \alpha_0)]}{A_1^2 + A_0^2 - 2A_1 A_0 \cos(\alpha_1 - \alpha_0)} + \dots + \\
 &\left. + \frac{m_n \omega^2 A_n [A_1 \cos(\alpha_n - \alpha_1) - A_0 \cos(\alpha_n - \alpha_0)]}{A_1^2 + A_0^2 - 2A_1 A_0 \cos(\alpha_1 - \alpha_0)} \right\}, \\
 &\dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\
 r_k &= -\frac{1}{\omega} \left\{ \frac{m_k \omega^2 A_k [A_k \sin(\alpha_k - \alpha_k) - A_{k-1} \sin(\alpha_k - \alpha_{k-1})]}{A_k^2 + A_{k-1}^2 - 2A_k A_{k-1} \cos(\alpha_k - \alpha_{k-1})} + \dots + \right. \\
 &\left. + \frac{m_n \omega^2 A_n [A_k \sin(\alpha_n - \alpha_k) - A_{k-1} \sin(\alpha_n - \alpha_{k-1})]}{A_k^2 + A_{k-1}^2 - 2A_k A_{k-1} \cos(\alpha_k - \alpha_{k-1})} \right\}, \\
 c_k &= \left\{ \frac{m_k \omega^2 A_k [A_k \cos(\alpha_k - \alpha_k) - A_{k-1} \cos(\alpha_k - \alpha_{k-1})]}{A_k^2 + A_{k-1}^2 - 2A_k A_{k-1} \cos(\alpha_k - \alpha_{k-1})} + \dots + \right. & (19) \\
 &\left. + \frac{m_n \omega^2 A_n [A_k \cos(\alpha_k - \alpha_{k-1}) - A_{k-1} \cos(\alpha_k - \alpha_{k-1})]}{A_k^2 + A_{k-1}^2 - 2A_k A_{k-1} \cos(\alpha_k - \alpha_{k-1})} \right\}, \\
 &\dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\
 r_n &= -\frac{m_n \omega^2 A_n [A_n \sin(\alpha_n - \alpha_n) - A_{n-1} \sin(\alpha_n - \alpha_{n-1})]}{[A_n^2 + A_{n-1}^2 - 2A_n A_{n-1} \cos(\alpha_n - \alpha_{n-1})] \omega}, \\
 c_n &= \frac{m_n \omega^2 A_n [A_n \cos(\alpha_n - \alpha_n) - A_{n-1} \cos(\alpha_n - \alpha_{n-1})]}{A_n^2 + A_{n-1}^2 - 2A_n A_{n-1} \cos(\alpha_n - \alpha_{n-1})}. & (20)
 \end{aligned}$$

Для систем, у которых граничная масса  $m_n$  закреплена с помощью элемента жесткости  $c_{n+1}$  и сопротивления перемещению  $r_{n+1}$ , можно построить алгоритм вычисления параметров системы дифференциальных уравнений, используя последовательный способ решения, изложенный для систем со свободным колебанием граничной массы. Рассмотрим данный способ решения задачи на примере колебаний двухмассовой системы (рисунок 2).

Уравнения движения, задающие колебания масс  $m_1$  и  $m_2$ , представляют собой систему дифференциальных уравнений вида

$$\begin{cases} m_1 \ddot{y}_1 + r_1 \dot{y}_1 + c_1 y_1 + r_2 (\dot{y}_1 - \dot{y}_2) + c_2 (y_1 - y_2) = r_1 \dot{y}_0 + c_1 y_0, \\ m_2 \ddot{y}_2 + r_2 (\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + c_2 (y_2 - y_1) - r_3 \dot{y}_2 - c_3 y_2 = 0, \\ r_3 \dot{y}_2 + c_3 y_2 = f \sin(\omega t + \beta). \end{cases} \quad (21)$$

Раскроем третье равенство системы (21), подставив значения  $y_1, y_2$  в виде гармонических функций. В результате получим

$$\begin{aligned} r_3 \omega A_2 (\cos \omega t \cos \alpha_2 - \sin \omega t \sin \alpha_2) + c_3 A_2 (\sin \omega t \cos \alpha_2 + \cos \omega t \sin \alpha_2) = \\ = f (\sin \omega t \cos \beta + \cos \omega t \sin \beta). \end{aligned}$$

При разделении уравнения на синусные и косинусные составляющие оно преобразуется в систему алгебраических уравнений

$$\begin{cases} -r_3 \omega A_2 \sin \alpha_2 + c_3 A_2 \cos \alpha_2 = f \cos \beta, \\ r_3 \omega A_2 \cos \alpha_2 + c_3 A_2 \sin \alpha_2 = f \sin \beta. \end{cases} \quad (22)$$

Решением системы (22) будут функции

$$r_3 = -\frac{f \sin(\alpha_2 - \beta)}{A_2}, \quad c_3 = \frac{f \cos(\alpha_2 - \beta)}{A_2}.$$

Если сложить правые и левые части второго и третьего уравнений системы (21) и с полученным результатом проделать такие преобразования, как и для третьего уравнения, то получим систему уравнений, аналогичную системе (9):

$$\begin{cases} -r_2 \omega (A_2 \sin \alpha_2 - A_1 \sin \alpha_1) + c_2 (A_2 \cos \alpha_2 - A_1 \cos \alpha_1) = \\ \quad = m_2 \omega^2 A_2 \cos \alpha_2 + f \cos \beta, \\ r_2 \omega (A_2 \cos \alpha_2 - A_1 \cos \alpha_1) + c_2 (A_2 \sin \alpha_2 - A_1 \sin \alpha_1) = \\ \quad = m_2 \omega^2 A_2 \sin \alpha_2 + f \sin \beta. \end{cases} \quad (23)$$

Используя метод Крамера, вычисляем определители:

$$\Delta = \begin{pmatrix} -(A_2 \sin \alpha_2 - A_1 \sin \alpha_1) & (A_2 \cos \alpha_2 - A_1 \cos \alpha_1) \\ (A_2 \cos \alpha_2 - A_1 \cos \alpha_1) & (A_2 \sin \alpha_2 - A_1 \sin \alpha_1) \end{pmatrix} = -[A_2^2 + A_1^2 - 2A_1 A_2 \cos(\alpha_2 - \alpha_1)],$$

$$\Delta r = \begin{pmatrix} (f \cos \beta + m_2 \omega^2 A_2 \cos \alpha_2) & (A_2 \cos \alpha_2 - A_1 \cos \alpha_1) \\ (f \sin \beta + m_2 \omega^2 A_2 \sin \alpha_2) & (A_2 \sin \alpha_2 - A_1 \sin \alpha_1) \end{pmatrix} =$$

$$= f [A_2 \sin(\alpha_2 - \beta) - A_1 \sin(\alpha_1 - \beta)] + m_2 \omega^2 [A_2^2 \sin(\alpha_2 - \alpha_2) - A_2 A_1 \sin(\alpha_2 - \alpha_1)],$$

$$\Delta c = \begin{pmatrix} -(A_2 \sin \alpha_2 - A_1 \sin \alpha_1) & (f \cos \beta + m_2 \omega^2 A_2 \cos \alpha_2) \\ (A_2 \cos \alpha_2 - A_1 \cos \alpha_1) & (f \sin \beta + m_2 \omega^2 A_2 \sin \alpha_2) \end{pmatrix} =$$

$$= -f [A_2 \cos(\alpha_2 - \beta) - A_1 \cos(\alpha_1 - \beta)] - m_2 \omega^2 [A_2^2 \cos(\alpha_2 - \alpha_2) - A_2 A_1 \sin(\alpha_2 - \alpha_1)],$$

откуда

$$r_2 = \frac{\Delta r}{\Delta} = -\frac{f [A_2 \sin(\alpha_2 - \beta) - A_1 \sin(\alpha_1 - \beta)]}{[A_2^2 + A_1^2 - 2A_1 A_2 \cos(\alpha_2 - \alpha_1)] \omega} + \frac{m_2 \omega^2 A_2 [A_2 \sin(\alpha_2 - \alpha_2) - A_1 \sin(\alpha_2 - \alpha_1)]}{[A_2^2 + A_1^2 - 2A_1 A_2 \cos(\alpha_2 - \alpha_1)] \omega},$$

$$c_2 = \frac{\Delta c}{\Delta} = \frac{f [A_2 \cos(\alpha_2 - \beta) - A_1 \cos(\alpha_1 - \beta)]}{A_2^2 + A_1^2 - 2A_1 A_2 \cos(\alpha_2 - \alpha_1)} + \frac{m_2 \omega^2 A_2 [A_2 \cos(\alpha_2 - \alpha_2) - A_1 \cos(\alpha_2 - \alpha_1)]}{A_2^2 + A_1^2 - 2A_1 A_2 \cos(\alpha_2 - \alpha_1)}.$$

Применяя прием, как и при решении уравнений (23), получаем систему

$$\begin{cases} -r_1 \omega (A_1 \sin \alpha_1 - A_0 \sin \alpha_0) + c_1 (A_1 \cos \alpha_1 - A_0 \cos \alpha_0) = m_1 \omega^2 A_1 \cos \alpha_1 + \\ \quad + m_2 \omega^2 A_2 \cos \alpha_2 + f \cos \beta, \\ r_1 \omega (A_1 \cos \alpha_1 - A_0 \cos \alpha_0) + c_1 (A_1 \sin \alpha_1 - A_0 \sin \alpha_0) = m_1 \omega^2 A_1 \sin \alpha_1 + \\ \quad + m_2 \omega^2 A_2 \sin \alpha_2 + f \sin \beta, \end{cases}$$

решением которой будут следующие функции:

$$r_1 = - \left\{ \frac{m_1 \omega^2 A_1 [A_1 \sin(\alpha_1 - \alpha_1) - A_0 \sin(\alpha_1 - \alpha_0)]}{[A_1^2 + A_0^2 - 2A_1 A_0 \cos(\alpha_1 - \alpha_0)] \omega} + \frac{m_2 \omega^2 A_2 [A_1 \sin(\alpha_2 - \alpha_1) - A_0 \sin(\alpha_2 - \alpha_0)]}{[A_1^2 + A_0^2 - 2A_1 A_0 \cos(\alpha_1 - \alpha_0)] \omega} + \frac{f [A_1 \sin(\alpha_1 - \beta) - A_0 \sin(\alpha_0 - \beta)]}{[A_1^2 + A_0^2 - 2A_1 A_0 \cos(\alpha_1 - \alpha_0)] \omega} \right\},$$

$$c_1 = \frac{m_1 \omega^2 [A_1^2 \cos(\alpha_1 - \alpha_1) - A_1 A_0 \cos(\alpha_1 - \alpha_0)]}{A_1^2 + A_0^2 - 2A_1 A_0 \cos(\alpha_1 - \alpha_0)} + \frac{m_2 \omega^2 [A_2 A_1 \cos(\alpha_2 - \alpha_1) - A_2 A_0 \cos(\alpha_2 - \alpha_0)]}{A_1^2 + A_0^2 - 2A_1 A_0 \cos(\alpha_1 - \alpha_0)} + \frac{f [A_1 \cos(\alpha_1 - \beta) - A_0 \cos(\alpha_0 - \beta)]}{A_1^2 + A_0^2 - 2A_1 A_0 \cos(\alpha_1 - \alpha_0)}.$$

Для многомассового объекта, структурная схема которого приведена на рисунке б, система дифференциальных уравнений будет иметь вид

$$\left\{ \begin{array}{l} m_1 \ddot{y}_1 + r_1 \dot{y}_1 + c_1 y_1 + r_2 (\dot{y}_1 - \dot{y}_2) + c_2 (y_1 - y_2) = r_1 \dot{y}_0 + c_1 y_0, \\ m_2 \ddot{y}_2 + r_2 (\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + c_2 (y_2 - y_1) - r_3 (\dot{y}_3 - \dot{y}_2) - c_3 (y_3 - y_2) = 0, \\ \dots \dots \dots \dots \\ m_k \ddot{y}_k + r_k (\dot{y}_k - \dot{y}_{k-1}) + c_k (y_k - y_{k-1}) - r_{k+1} (\dot{y}_{k+1} - \dot{y}_k) - c_{k+1} (y_{k+1} - y_k) = 0, \\ \dots \dots \dots \dots \\ m_{n-1} \ddot{y}_{n-1} + r_{n-1} (\dot{y}_{n-1} - \dot{y}_{n-2}) + c_{n-1} (y_{n-1} - y_{n-2}) - r_n (\dot{y}_n - \dot{y}_{n-1}) - c_n (y_n - y_{n-1}) = 0, \\ m_n \ddot{y}_n + r_n (\dot{y}_n - \dot{y}_{n-1}) + c_n (y_n - y_{n-1}) - r_{n+1} \dot{y}_n - c_{n+1} y_n = 0, \\ r_{n+1} \dot{y}_n + c_{n+1} y_n = f \sin(\omega t + \beta). \end{array} \right. \quad (24)$$

Преобразуем систему (24), как и в предыдущем случае, в алгебраическую, содержащую  $2n + 2$  уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} -r_1 \omega (A_1 \sin \alpha_1 - A_0 \sin \alpha_0) + c_1 (A_1 \cos \alpha_1 - A_0 \cos \alpha_0) + \\ + r_2 \omega (A_2 \sin \alpha_2 - A_1 \sin \alpha_1) - c_2 (A_2 \cos \alpha_2 - A_1 \cos \alpha_1) = m_1 \omega^2 A_1 \cos \alpha_1, \\ r_1 \omega (A_1 \cos \alpha_1 - A_0 \cos \alpha_0) + c_1 (A_1 \sin \alpha_1 - A_0 \sin \alpha_0) - \\ - r_2 \omega (A_2 \cos \alpha_2 - A_1 \cos \alpha_1) - c_2 (A_2 \sin \alpha_2 - A_1 \sin \alpha_1) = m_1 \omega^2 A_1 \sin \alpha_1, \end{array} \right. \quad (25)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} -r_2 \omega (A_2 \sin \alpha_2 - A_1 \sin \alpha_1) + c_2 (A_2 \cos \alpha_2 - A_1 \cos \alpha_1) + \\ + r_3 \omega (A_3 \sin \alpha_3 - A_2 \sin \alpha_2) - c_3 (A_3 \cos \alpha_3 - A_2 \cos \alpha_2) = m_2 \omega^2 A_2 \cos \alpha_2, \\ r_2 \omega (A_2 \cos \alpha_2 - A_1 \cos \alpha_1) + c_2 (A_2 \sin \alpha_2 - A_1 \sin \alpha_1) - \\ - r_3 \omega (A_3 \cos \alpha_3 - A_2 \cos \alpha_2) - c_3 (A_3 \sin \alpha_3 - A_2 \sin \alpha_2) = m_2 \omega^2 A_2 \sin \alpha_2, \end{array} \right. \quad (26)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} -r_k \omega (A_k \sin \alpha_k - A_{k-1} \sin \alpha_{k-1}) + c_k (A_k \cos \alpha_k - A_{k-1} \cos \alpha_{k-1}) + \\ + r_{k+1} \omega (A_{k+1} \sin \alpha_{k+1} - A_k \sin \alpha_k) - c_{k+1} (A_{k+1} \cos \alpha_{k+1} - A_k \cos \alpha_k) = m_k \omega^2 A_k \cos \alpha_k, \\ r_k \omega (A_k \cos \alpha_k - A_{k-1} \cos \alpha_{k-1}) + c_k (A_k \sin \alpha_k - A_{k-1} \sin \alpha_{k-1}) - \\ - r_{k+1} \omega (A_{k+1} \cos \alpha_{k+1} - A_k \cos \alpha_k) - c_{k+1} (A_{k+1} \sin \alpha_{k+1} - A_k \sin \alpha_k) = m_k \omega^2 A_k \sin \alpha_k, \end{array} \right. \quad (27)$$



$$\begin{cases} -r_{n-1}\omega(A_{n-1}\sin\alpha_{n-1} - A_{n-2}\sin\alpha_{n-2}) + c_{n-1}(A_{n-1}\cos\alpha_{n-1} - \\ - A_{n-2}\cos\alpha_{n-2}) + r_n\omega(A_n\sin\alpha_n - A_{n-1}\sin\alpha_{n-1}) - \\ - c_{n-1}(A_n\sin\alpha_n - A_{n-1}\sin\alpha_{n-1}) = m_{n-1}\omega^2 A_{n-1}\cos\alpha_{n-1}, \\ r_{n-1}\omega(A_{n-1}\cos\alpha_{n-1} - A_{n-2}\cos\alpha_{n-2}) + c_{n-1}(A_{n-1}\sin\alpha_{n-1} - \\ - A_{n-2}\sin\alpha_{n-2}) - r_n\omega(A_n\cos\alpha_n - A_{n-1}\cos\alpha_{n-1}) - \\ - c_{n-1}(A_n\cos\alpha_n - A_{n-1}\cos\alpha_{n-1}) = m_{n-1}\omega^2 A_{n-1}\sin\alpha_{n-1}, \end{cases} \quad (28)$$

$$\begin{cases} -r_n\omega(A_n\sin\alpha_n - A_{n-1}\sin\alpha_{n-1}) + c_n(A_n\cos\alpha_n - A_{n-1}\cos\alpha_{n-1}) + \\ + r_{n+1}\omega A_n\sin\alpha_n - c_{n+1}A_n\cos\alpha_n = m_n\omega^2 A_n\cos\alpha_n, \\ r_n\omega(A_n\cos\alpha_n - A_{n-1}\cos\alpha_{n-1}) + c_n(A_n\sin\alpha_n - A_{n-1}\sin\alpha_{n-1}) - \\ - r_{n+1}\omega A_n\cos\alpha_n - c_{n+1}A_n\sin\alpha_n = m_n\omega^2 A_n\sin\alpha_n, \end{cases} \quad (29)$$

$$\begin{cases} -r_{n+1}\omega A_n\sin\alpha_n + c_{n+1}A_n\cos\alpha_n = f\cos\beta \\ r_{n+1}\omega A_n\cos\alpha_n + c_{n+1}A_n\sin\alpha_n = f\sin\beta. \end{cases} \quad (30)$$

Решением системы (30) будут функции

$$r_{n+1} = -\frac{fA_n\sin(\alpha_n - \beta)}{\omega A_n^2}, \quad c_{n+1} = \frac{fA_n\cos(\alpha_n - \beta)}{A_n^2}. \quad (31)$$

Просуммируем левую и правую части равенств систем (29) и (30). В результате получим соотношения

$$\begin{cases} -r_n\omega(A_n\sin\alpha_n - A_{n-1}\sin\alpha_{n-1}) + c_n(A_n\cos\alpha_n - A_{n-1}\cos\alpha_{n-1}) = f\cos\beta + m_n\omega^2 A_n\cos\alpha_n, \\ r_n\omega(A_n\cos\alpha_n - A_{n-1}\cos\alpha_{n-1}) + c_n(A_n\sin\alpha_n - A_{n-1}\sin\alpha_{n-1}) = f\sin\beta + m_n\omega^2 A_n\sin\alpha_n, \end{cases}$$

решение которых с точностью до индексов совпадает с решением системы (23):

$$\begin{aligned} r_n &= -\frac{f[A_n\sin(\alpha_n - \beta) - A_{n-1}\sin(\alpha_{n-1} - \beta)]}{[A_n^2 + A_{n-1}^2 - 2A_nA_{n-1}\cos(\alpha_n - \alpha_{n-1})]\omega} + \frac{m_n\omega^2 A_n[A_n\sin(\alpha_n - \alpha_n) - A_{n-1}\sin(\alpha_n - \alpha_{n-1})]}{[A_n^2 + A_{n-1}^2 - 2A_nA_{n-1}\cos(\alpha_n - \alpha_{n-1})]\omega}, \\ c_n &= \frac{f[A_n\cos(\alpha_n - \beta) - A_{n-1}\cos(\alpha_{n-1} - \beta)]}{A_n^2 + A_{n-1}^2 - 2A_nA_{n-1}\cos(\alpha_n - \alpha_{n-1})} + \frac{m_n\omega^2 A_n[A_n\cos(\alpha_n - \alpha_n) - A_{n-1}\cos(\alpha_n - \alpha_{n-1})]}{A_n^2 + A_{n-1}^2 - 2A_nA_{n-1}\cos(\alpha_n - \alpha_{n-1})}. \end{aligned} \quad (32)$$

Выполнив последовательное решение систем (25) – (28), будем иметь следующий результат:

$$\begin{aligned} r_{n-1} &= -\frac{f[A_{n-1}\sin(\alpha_{n-1} - \beta) - A_{n-2}\sin(\alpha_{n-2} - \beta)]}{[A_{n-1}^2 + A_{n-2}^2 - 2A_{n-1}A_{n-2}\cos(\alpha_{n-1} - \alpha_{n-2})]\omega} + \\ &+ \frac{m_{n-1}\omega^2 A_{n-1}[A_{n-1}\sin(\alpha_{n-1} - \alpha_{n-1}) - A_{n-2}\sin(\alpha_{n-1} - \alpha_{n-2})]}{[A_{n-1}^2 + A_{n-2}^2 - 2A_{n-1}A_{n-2}\cos(\alpha_{n-1} - \alpha_{n-2})]\omega} + \\ &+ \frac{m_n\omega^2 A_n[A_{n-1}\sin(\alpha_n - \alpha_{n-1}) - A_{n-2}\sin(\alpha_{n-1} - \alpha_{n-2})]}{[A_{n-1}^2 + A_{n-2}^2 - 2A_{n-1}A_{n-2}\cos(\alpha_{n-1} - \alpha_{n-2})]\omega}, \\ c_{n-1} &= \frac{f[A_{n-1}\cos(\alpha_{n-1} - \beta) - A_{n-2}\cos(\alpha_{n-2} - \beta)]}{[A_{n-1}^2 + A_{n-2}^2 - 2A_{n-1}A_{n-2}\cos(\alpha_{n-1} - \alpha_{n-2})]\omega} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{m_{n-1}\omega^2 A_{n-1} [A_{n-1} \cos(\alpha_{n-1} - \alpha_{n-1}) - A_{n-2} \cos(\alpha_{n-1} - \alpha_{n-2})]}{A_{n-1}^2 + A_{n-2}^2 - 2A_{n-1}A_{n-2} \cos(\alpha_{n-1} - \alpha_{n-2})} + \\
 & + \frac{m_n \omega^2 A_n [A_{n-1} \cos(\alpha_n - \alpha_{n-1}) - A_{n-2} \cos(\alpha_{n-1} - \alpha_{n-2})]}{A_{n-1}^2 + A_{n-2}^2 - 2A_{n-1}A_{n-2} \cos(\alpha_{n-1} - \alpha_{n-2})}, \tag{33} \\
 & \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 r_k = & - \frac{f [A_k \sin(\alpha_k - \beta) - A_{k-1} \sin(\alpha_{k-1} - \beta)]}{[A_k^2 + A_{k-1}^2 - 2A_k A_{k-1} \cos(\alpha_k - \alpha_{k-1})] \omega} + \frac{\omega^2 \sum_{i=k}^n m_i A_i [A_k \sin(\alpha_i - \alpha_k) - A_{k-1} \sin(\alpha_i - \alpha_{k-1})]}{[A_k^2 + A_{k-1}^2 - 2A_k A_{k-1} \cos(\alpha_k - \alpha_{k-1})] \omega}, \\
 c_k = & \frac{f [A_k \cos(\alpha_k - \beta) - A_{k-1} \cos(\alpha_{k-1} - \beta)]}{A_k^2 + A_{k-1}^2 - 2A_k A_{k-1} \cos(\alpha_k - \alpha_{k-1})} +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{\omega^2 \sum_{i=k}^n m_i A_i [A_k \cos(\alpha_i - \alpha_k) - A_{k-1} \cos(\alpha_i - \alpha_{k-1})]}{A_k^2 + A_{k-1}^2 - 2A_k A_{k-1} \cos(\alpha_k - \alpha_{k-1})}, \tag{34} \\
 & \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 r_1 = & - \frac{f [A_1 \sin(\alpha_1 - \beta) - A_0 \sin(\alpha_0 - \beta)]}{[A_1^2 + A_0^2 - 2A_1 A_0 \cos(\alpha_1 - \alpha_0)] \omega} + \frac{\omega^2 \sum_{i=1}^n m_i A_i [A_1 \sin(\alpha_i - \alpha_1) - A_0 \sin(\alpha_i - \alpha_0)]}{[A_1^2 + A_0^2 - 2A_1 A_0 \cos(\alpha_1 - \alpha_0)] \omega}, \\
 c_1 = & \frac{f [A_1 \cos(\alpha_1 - \beta) - A_0 \cos(\alpha_0 - \beta)]}{A_1^2 + A_0^2 - 2A_1 A_0 \cos(\alpha_1 - \alpha_0)} + \frac{\omega^2 \sum_{i=1}^n m_i A_i [A_1 \sin(\alpha_i - \alpha_1) - A_0 \sin(\alpha_i - \alpha_0)]}{A_1^2 + A_0^2 - 2A_1 A_0 \cos(\alpha_1 - \alpha_0)}. \tag{35}
 \end{aligned}$$

Таким образом, чтобы вычислить параметры многомассовых моделей, схемы которых приведены на рисунке *a*, *b*, необходимо в процессе эксперимента измерить функции перемещения каждой из масс, а для системы, у которой граничная масса закреплена неподвижно, измерить величину силы, возникшей от перемещения масс. По полученным результатам вычислить амплитуды  $A_k$  и фазы  $\alpha_k$ , используя формулы (18)–(20) либо (31)–(35) (в зависимости от типа системы), определить коэффициенты жесткости и демпфирования и подставив их в уравнения модели выполнить процедуру верификации.

**Правила проведения стендовых испытаний.** Анализ полученных формул для вычисления параметров многомассовой колебательной системы свидетельствует о том, что она обладает памятью. На колебания каждой из масс воздействуют силы инерции остальных масс. Следовательно, мы рассматриваем колебания взаимно связанных элементов. Поэтому информация, полученная в режиме статических испытаний данных систем, не будет отражать динамику колебаний исследуемого объекта. Стендовые испытания необходимо проводить в режиме вынужденных колебаний. При этом в качестве вынуждающей должна быть использована сила, полученная от воздействия на первое звено элементов поддрессоривания функцией перемещения (4). Тогда вынуждающая сила (3) вызовет перемещение  $y_1(t)$  массы  $m_1$ , а реакция на него будет вынуждающей силой для движения массы  $m_2$  и т. д. Колебания масс в этом случае будут неустановившимися, а их процесс – переходным. Процедуру измерения можно проводить по окончании переходного процесса, длительность которого называется временем памяти динамической системы. По завершении переходного процесса все  $n$  масс будут колебаться в установившемся режиме.

При использовании приведенных выше формул вычислим  $r_k$ ,  $c_k$  и, подставив полученные параметры в модель, выполним виртуальные испытания. По результатам сравнительного анализа (виртуальных и стендовых испытаний) делаем вывод об адекватности модели реальному объекту.

Если в результате сравнения модель удовлетворяет требованиям точности, то ее можно использовать для проведения прочностных расчетов, анализа вибронагруженности и для других видов исследований, необходимых для получения заключения о пригодности проектируемого

изделия к изготовлению и проведению заключительных натурных испытаний в условиях эксплуатации.

**Заключение.** Изложены методы вычисления параметров математического описания динамики колебаний технических систем, для которых в качестве математической модели используются дифференциальные уравнения. Такую модель можно построить, применяя методы приведения уравнения к обобщенной системе координат, т. е. к уравнению Лагранжа второго рода. Источником информации для идентификации параметров являются результаты измерений, проведенных при испытании реальной конструкции.

Использование для экспериментального исследования многомассовых систем в качестве тестовых сигналов гармонических функций позволило легко перейти от систем дифференциальных уравнений к алгебраическим, что значительно сократило объем вычислений и упростило решение задачи. Кроме того, применение гармонических сигналов при проведении стендовых испытаний дает возможность построить математическую модель для систем со слабой нелинейностью, используя для этого метод гармонической линеаризации, а для нелинейных систем с памятью – матричный оператор, описывающий математическую зависимость выходной функции от входа [7].

Получены формулы вычисления коэффициентов жесткости и демпфирования упругих элементов, которые учитывают взаимную зависимость колебаний отдельных масс, вызывающих резонансные явления. Рассмотрены два типа систем, содержащих счетное число колебательных элементов. У первого типа граничная масса в режиме вынужденных колебаний выполняет свободные колебания, а у второго она закреплена с использованием упругого и демпфирующего элементов. Результаты работы могут быть использованы при верификации компьютерных многомассовых моделей объектов машиностроения и моделировании машиностроительных конструкций с использованием конечно-элементных моделей.

#### Список использованных источников

1. Афанасьева, О. В. Некоторые свойства движения многомассовых систем. Тр. междунар. конференции KDS-98. – Польша, Щетин, 1998.
2. Пановко, Я. Г. Введение в теорию механических колебаний / Я. Г. Пановко. – М.: Наука, 1991.
3. Сурьянов, Н. Г. Теоретические основы динамики машин / Н. Г. Сурьянов, А. Ф. Дашенко, Белоус. – Одесса, ОГПУ, 2000, 306 с.
4. Ден-Гартог, Дж. П. Механические колебания. М.: Физматгиз, 1960, 580 с.
5. Ротенберг, Р. В. Подвеска автомобиля и его колебания / Р. В. Ротенберг. – М.: Mashgiz, 1960.
6. Кончак, В. С. Методы определения динамических характеристик упругих элементов подвески по экспериментальным данным / В. С. Кончак, А. Н. Колесникович, С. П. Лазакович, С. В. Хитриков // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2008 – № 2. С. 20–25.
7. Кончак, В. С. Верификация компьютерных моделей механических конструкций с использованием результатов эксперимента / В. С. Кончак, А. А. Назаренко // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2016 – № 3. С. 35–45.

#### References

1. Afanas'eva, O. V. (1998), "Some properties of motion of multibody systems", *Trudy mezhdunarodnoi konferentsii KDS-98* [Proceedings of the International Conference KDS-98], Szczecin, Poland.
2. Panovko, Ja. G. (1991), *Vvedenie v teoriyu mekhanicheskikh kolebanii* [Introduction to the Theory of mechanical vibrations], Nauka, Moscow, RU.
3. Sur'yanov, N. G., Dashchenko, A. F. and Belous, P. A. (2000), *Teoreticheskie osnovy dinamiki mashin* [Theoretical foundations of dynamics of machines], National Polytechnic University, Odessa, UA.
4. Den Hartog, J. P. (1960), *Mekhanicheskie kolebaniya* [Mechanical Vibrations], Fizmatgiz, Moscow, RU.
5. Rotenberg, R. V. (1960), *Podveska avtomobilya i ego kolebaniya* [Suspension of the car and his fluctuations], Mashgiz, Moscow, RU.
6. Konchak, V. S., Kolesnikovich, A. N., Lazakovich, S. P. and Hitrikov, S. V. (2008), "Methods of determination of dynamic parameters of elastic elements of suspension by experimental data", *Vestsi NAN Belarusi. Ser. fiz.-tekhn. navuk* [Proceedings of the National academy of science of Belarus. Physico-technical series], no. 2, pp. 20–25.
7. Konchak, V. S. and Nazarenko, A. A. (2016), "Verification of computer models of mechanical structures using experimental results", *Vestsi NAN Belarusi. Ser. fiz.-tekhn. navuk* [Proceedings of the National Academy of Science of Belarus. Physico-technical series], no. 3, pp. 35–45.

### Информация об авторах

*Кончак Вячеслав Станиславович* – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник. Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси (220072, г. Минск, ул. Академическая, 12, Беларусь). Тел.: +375-17-284-24-46; +375-29-766-69-81.

*Назаренко Андрей Алексеевич* – аспирант. Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси (220012, г. Минск, ул. Сурганова, 6, Беларусь). Тел.: +375-29-762-62-62.

### Для цитирования

Кончак, В. С. Методика подготовки многомассовых компьютерных моделей к верификации / В. С. Кончак, А. А. Назаренко // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2016. – № 4. – С. 49–60.

### Information about the authors

*Konchak Vjacheslav Stanislavovich* – Ph. D. (Engineering), Leading Researcher. The Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (12, Akademicheskaya str., 220072, Minsk, Belarus). Tel.: +375-17-284-24-48; +375-29-766-69-81.

*Nazarenko Andrej Alekseevich* – postgraduate student. The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Sarganova str., 220012, Minsk, Belarus). Tel.: +375-29-762-62-62.

### Forcitation

Konchak V. S., Nazarenko A. A. A method for preparation of multimass computer models for verification procedure. Proceedings of the National academy of science of Belarus. physical-technicalseries. 2016, no. 4, pp. 49–60.

**Д. А. Дубовик, В. И. Прибыльский**

*Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Беларусь*

## **ГИДРООБЪЕМНО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ТРАНСМИССИИ МОБИЛЬНЫХ МАШИН. РАСЧЕТ КИНЕМАТИЧЕСКИХ И СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ**

Высокий КПД, бесступенчатое регулирование скорости и мощности все более привлекает потребителей и производителей мобильных машин технологического назначения (особенно сельскохозяйственных) к применению многопоточных трансмиссий. К настоящему времени из 80% мирового рынка тракторной техники 18% составляют тракторы с гидрообъемно-механическими трансмиссиями (ГОМТ).

Целью данной статьи является разработка методики определения работоспособности возможных схем ГОМТ. Так как из литературных источников известно, что только основных структурных схем ГОМТ может быть 12 одноконтурных (один дифференциал) и 288 двухконтурных (два дифференциала). Для этого предложен метод оценки работоспособности возможных схем ГОМТ по критерию непрерывности функции угловых скоростей звеньев от параметров регулирования гидромашин. Для реализации метода разработана методика расчета кинематических и силовых параметров составлением и решением уравнений, описывающих взаимодействия компонентов одноконтурных и двухконтурных схем ГОМТ. Установлены аналитические зависимости для определения точек разрыва второго рода функции угловых скоростей звеньев от параметров регулирования, рабочего объема гидромашин, передаточного отношения планетарного ряда дифференциалов.

Разработаны алгоритм и программа расчетов выбора неработоспособных схем ГОМТ. На примере расчетов и анализа вариантов схем для колесного трактора тягового класса 4 установлены условия, при которых трансмиссия теряет работоспособность вследствие превышения угловых скоростей звеньев их допустимым значениям. В результате данный метод позволяет исключить из рассмотрения 5 вариантов одноконтурных и 257 из 576 вариантов двухконтурных схем ГОМТ.

*Ключевые слова:* мобильные машины, гидрообъемно-механические трансмиссии, гидрообъемные передачи, дифференциалы, одноконтурные, двухконтурные схемы, расчет, анализ, работоспособность.

**D. A. Doubovik, V. I. Prybylski**

*The Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

## **HYDROSTATIC-MECHANICAL TRANSMISSIONS OF MOBILE MACHINES. CALCULATION OF KINEMATIC AND FORCE PARAMETERS**

High efficiency, stepless regulation of speed and power increasingly attracts consumers and manufacturers of technological mobile machines, especially agricultural, to use multi-flow transmissions. To date, amongst 80% of the world market of tractor equipment, produced by leading manufacturers, 18% are tractors with hydrostatic-mechanical transmissions.

The aim of this work is to develop a methodology for determining the ability to work of hydrostatic-mechanical transmissions possible schemes. From the literature it is known that 12 single-circuit (with one differential) and 288 double-circuit (with two differentials) there can be only the main structural schemes of hydrostatic-mechanical transmissions. To achieve the aim, a method for estimating an ability to work of possible schemes of hydrostatic-mechanical transmissions according to the criterion of continuity of the function of angular velocities of the links from the regulation parameters of hydraulic machines is proposed. To implement the proposed method, a methodology of calculation of kinematic and power parameters by means of appraising and solving equations that describe the interaction between the elements of single-circuit and double-circuit schemes of hydrostatic-mechanical transmissions, is developed. Analytical dependences for determination of points of discontinuity of the second kind of function of angular velocities of links from the regulation parameters and the working volume of hydraulic machines, the gear ratio of planetary gear set of differential, are determined.

The calculation algorithm and the software for selection of the inoperative scheme of hydrostatic-mechanical transmissions are developed. For example, by means of calculations and analysis of variants of schemes for wheeled tractor of tractive class 4, the conditions under which the transmission loses ability to work due to exceeding of angular velocities of

links their allowable values, were defined. As a result, the method allows excluding from consideration 5 variants of single-circuit schemes and 257 variants from the 576 double-circuit schemes of hydrostatic-mechanical transmissions.

*Keywords:* mobile machines, stepless regulation of speed, hydrostatic-mechanical transmission, hydrostatic transmission, differentials, single-circuit and double-circuit schemes, regulation parameters of hydraulic machines calculation, analysis, operability.

**Введение.** Одним из направлений повышения технического уровня мобильных машин технологического назначения (сельскохозяйственная, строительная, коммунальная, дорожная техника и т.д.) является разработка и применение многопоточных трансмиссий для привода ведущих колес и рабочих органов [1]. Эти трансмиссии позволяют осуществлять бесступенчатое регулирование скорости движения машины, снижать расход топлива за счет оптимизации режимов управления двигателем и подводом потоков мощности к различным потребителям, оптимизировать технологические операции автоматическим управлением процессами [2].

К настоящему времени существенно отработаны бесступенчатые трансмиссии с необходимым для мобильных машин диапазоном регулирования передаточных чисел двух типов: электрические и гидрообъемные [3]. При практически одинаковом уровне КПД, который оценивается в диапазоне значений 0,8–0,825, по массогабаритным параметрам и стоимости электрическая передача на современном этапе развития техники уступает гидрообъемной [4]. За последние три десятилетия практически в два раза улучшились технологические показатели гидрообъемных передач [5]: уменьшились средние рабочие зазоры в торцевом распределителе (с 30–40 мкм до 15–20 мкм), в поршневой группе (с 15–20 мкм до 7–10 мкм), более чем на 50% выросло максимальное рабочее (клапанное) давление в объемных гидромашинах. Это позволяет обеспечивать необходимые диапазоны регулирования скоростей и моментов за счет гидрообъемной передачи (ГОП) [6]. Поэтому большинство многопоточных трансмиссий составляют гидрообъемно-механические трансмиссии (ГОМТ). Из 400 тыс. тракторов, ежегодно выпускаемых такими известными корпорациями, как CNH, объединяющая фирмы Case IH, New Holland (США) и Steyr (Австрия); AGCO, объединяющая фирмы Fendt (Германия), Massey Ferguson, Challenger (США) и Valtra (Финляндия); SDF, объединяющая фирмы Same, Lamborghini (Италия) и Deutz-Fahr (Германия), а также двумя крупнейшими компаниями John Deere (США) и Claas (Германия), что составляет более 80% мирового рынка тракторной техники, 18% тракторов оснащены ГОМТ [7]. При этом с улучшением характеристик гидромашин область применения ГОМТ расширяется как по числу моделей тракторов, так и по передаваемой мощности. Вопросам расчета основных параметров ГОМТ посвящены работы [4–7], в которых рассматриваются только одноконтурные схемы.

Конструкторской проработке каждой трансмиссии предшествует ее проектный расчет, в ходе которого оценивается работоспособность принимаемой для конструирования схемы. Поэтому разработка методики определения работоспособности возможных схем ГОМТ является актуальной задачей и составляет цель настоящей статьи.

**Расчет кинематических и силовых параметров.** На этапе проектного расчета при оценке работоспособности различных схем ГОМТ возможно ограничиться расчетами без учета потерь мощности. Основной формулой для кинематических расчетов планетарных передач является формула Виллиса [8], которую целесообразно использовать в виде уравнения [6]

$$\omega_{1*} - k\omega_{2*} + (k - 1)\omega_{3*} = 0, \quad (1)$$

где  $\omega_{1*}$  – угловая скорость солнечной шестерни;  $\omega_{2*}$  – угловая скорость коронной шестерни;  $\omega_{3*}$  – угловая скорость водила;  $k$  – постоянная дифференциала (внутреннее передаточное отношение планетарного ряда).

Для расчетов гидрообъемной передачи служит уравнение

$$e_1 q_1 \omega_{e1} - e_2 q_2 \omega_{e2} = 0, \quad (2)$$

где  $\omega_{e1}$ ,  $\omega_{e2}$  – угловая скорость вала соответственно гидромашин 1 и гидромашин 2,  $e_1$ ,  $e_2$  – параметр регулирования,  $q_1$ ,  $q_2$  – рабочий объем соответственно гидромашин 1 и 2.

Для описания методики расчета кинематических и силовых параметров целесообразно рассмотреть отдельно одноконтурные (с одним дифференциальным механизмом) и двухконтурные (с двумя дифференциальными механизмами) схемы ГОМТ [8, 9].

**Одноконтурные схемы.** На рис. 1, а приведена расчетная схема одноконтурной ГОМТ с дифференциалом на выходе. Согласно расчетной схеме, для первого варианта схемы уравнения кинематики описываются системой

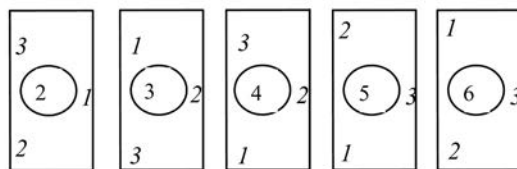
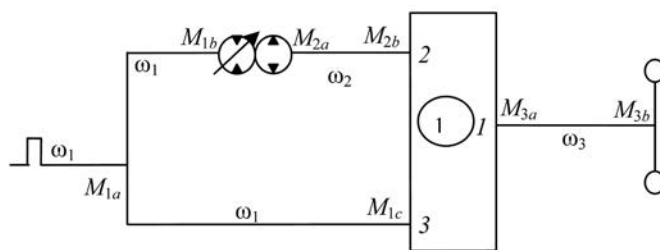
$$\begin{cases} \omega_3 - k\omega_2 + (k-1)\omega_1 = 0; \\ e_1q_1\omega_1 - e_2q_2\omega_2 = 0, \end{cases} \quad (3)$$

Для анализа работоспособности схем ГОМТ целесообразно решать системы уравнений в матричном виде

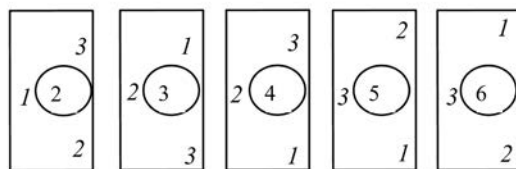
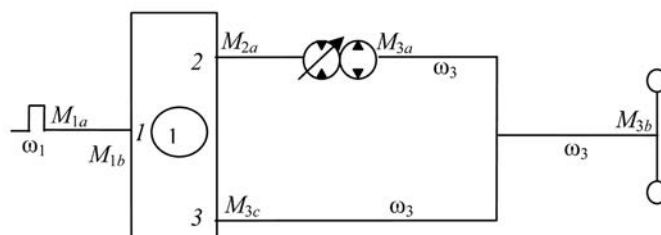
$$\Omega = K_{\omega}^{-1} \times C_{\omega}, \quad (4)$$

где  $K_{\omega} = \begin{vmatrix} -k & 1 \\ e_2 & q_2 \end{vmatrix}$  – матрица коэффициентов для первого варианта схемы одноконтурной ГОМТ;

$C_{\omega} = \begin{vmatrix} -(k-1)\omega_1 \\ e_1q_1\omega_1 \end{vmatrix}$  – матрица свободных членов;  $\Omega_{1\text{вых}} = \begin{vmatrix} \omega_2 \\ \omega_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{e_1q_1}{e_2q_2}\omega_1 \\ \frac{e_1q_1k - e_2q_2(k-1)}{e_2q_2}\omega_1 \end{vmatrix}$  – решение относительно искомых угловых скоростей.



а



б

Рис. 1. Расчетная схема одноконтурной ГОМТ с дифференциалом на выходе (а) и входе (б): 1 – солнечная шестерня; 2 – коронная шестерня; 3 – водило;  $\omega_1, \omega_3$  – угловая скорость соответственно вала двигателя и выходного вала дифференциала;  $M_{1a}, M_3$  – крутящий момент на валу соответственно двигателя и выходного вала дифференциала; цифры в окружностях (1–6) – варианты сочетаний звеньев дифференциала

Как видно из решения, первая схема математически может иметь бесконечное передаточное отношение при  $e_2 = 0$ , но практически это исключено, так как для аксиально-поршневых гидромоторов с наклонным диском допускается  $e_{2\min} = 0,333$ , с наклонным блоком цилиндров –  $e_{2\min} = 0,25$  [8], иначе гидромотор заклинивает.

Система уравнений, описывающая крутящие моменты для этой схемы, согласно статике имеет вид

$$\begin{cases} M_{3a} + M_{2b} + M_{1c} = 0; \\ M_{1a} + M_{1b} + M_{1c} = 0; \\ M_{3a}k + M_{2b} = 0; \\ M_{1b} + \frac{e_1q_1}{e_2q_2}M_{2a} = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Тогда решение следующее:

$$M = K^{-1} \times C, \quad (6)$$

где  $K = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{e_1q_1}{e_2q_2} & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}$  – матрица коэффициентов для первого варианта схемы одноконтур-

ной ГОМТ;  $C = \begin{vmatrix} -M_{3a} \\ 0 \\ -M_{3a}k \\ 0 \end{vmatrix}$  – матрица свободных членов;  $M$  – матрица крутящих моментов, прило-

женных к звеньям ГОМТ.

В результате решения уравнения (6) получается матрица определяемых крутящих моментов на звеньях ГОМТ:

$$M_{1\text{вх}} = \begin{vmatrix} M_{2b} \\ M_{1c} \\ M_{1b} \\ M_{1a} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -kM_{3a} \\ (k-1)M_{3a} \\ -\frac{e_1q_1k}{e_2q_2}M_{3a} \\ \frac{e_1q_1k - e_2q_2(k-1)}{e_2q_2}M_{3a} \end{vmatrix}. \quad (7)$$

Имея значения угловых скоростей и крутящих моментов звеньев ГОМТ, можно получить величины мощностей на входе и выходе звеньев по следующим формулам:

для механической части ГОМТ

$$N_i = M_i\omega_i, \quad (8)$$

для гидравлической части

$$N_i = \Delta p_i Q_i = \Delta p_i e_i q_i \omega_i, \quad (9)$$

где  $\Delta p_i = \frac{M_i}{e_i q_i}$  – перепад давления;  $Q_i$  – расход жидкости в гидромашине.

Аналогично рассчитываются кинематические и силовые характеристики остальных схем с дифференциалом на выходе. На рис. 1, б показана расчетная схема для ГОМТ с дифференциалом на входе. Члены матричного выражения и решение относительно угловых скоростей (4) для первого варианта имеют следующий вид:

$$C_\omega = \begin{vmatrix} -\omega_1 \\ 0 \end{vmatrix}; \quad K_\omega = \begin{vmatrix} -k & k-1 \\ e_1q_1 & -e_2q_2 \end{vmatrix}; \quad \Omega_{1\text{вх}} = \begin{vmatrix} \omega_2 \\ \omega_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{e_2q_2}{e_2q_2k - e_1q_1(k-1)}\omega_1 \\ \frac{e_1q_1}{e_2q_2k - e_1q_1(k-1)}\omega_1 \end{vmatrix}. \quad (10)$$



Система уравнений статики для первого варианта

$$\begin{cases} M_{3b} + M_{3a} + M_{3c} = 0; \\ M_{1b}k + M_{2a} = 0; \\ M_{1b} + M_{2a} + M_{3c} = 0; \\ M_{2b} + \frac{e_1q_1}{e_2q_2}M_{3a} = 0. \end{cases} \quad (11)$$

Члены матричного выражения и решение (6) относительно крутящих моментов для этого варианта имеют вид:

$$K = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & k \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ \frac{e_1q_1}{e_2q_2} & 0 & -1 & 0 \end{vmatrix}; C = \begin{vmatrix} -M_{3b} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}; M_{1bx} = \begin{vmatrix} M_{3a} \\ M_{3c} \\ M_{2a} \\ M_{1b} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{e_2q_2k}{e_2q_2k - e_1q_1(k-1)}M_{3b} \\ \frac{e_1q_1(k-1)}{e_2q_2k - e_1q_1(k-1)}M_{3b} \\ \frac{e_1q_1k}{e_2q_2k - e_1q_1(k-1)}M_{3b} \\ \frac{e_1q_1}{e_2q_2k - e_1q_1(k-1)}M_{3b} \end{vmatrix}. \quad (12)$$

Из анализа выражения (12) следует, что условием для возникновения состояния неработоспособности схемы ГОМТ является нулевое значение знаменателей решений матричного уравнения

$$e_2q_2k - e_1q_1(k-1) = 0. \quad (13)$$

Для анализа (13) проведен расчет ГОМТ, выполненной по одноконтурной схеме с исходными данными, близкими к характеристикам колесного трактора тягового класса 4: масса трактора 9000 кг, радиус колес 0,85 м, коэффициент сопротивления движению 0,5, частота вращения двигателя 2250 об/мин; максимальный рабочий объем гидромашин  $q_1 = q_2 = 1300/2\pi$  (см<sup>3</sup>/рад) [6].

Решение уравнения (13) относительно  $e_1$  дает зависимость  $e_{1\infty} = \frac{e_2kq_2}{(k-1)q_1}$  или при  $q_2 = q_1$   $k = -3$ ,  $e_2 = 1$ ,  $e_{1\infty} = 0,75$ . При этом значении  $e_1$  угловые скорости выходных звеньев дифференциала рассматриваемого варианта ГОМТ математически будут равны бесконечности и поменяют направление вращения на противоположное.

На рис. 2 приведены графические зависимости угловой скорости  $\omega_3$  (рис. 2, а) и крутящего момента  $M_{3a}$  (рис. 2, б) на валу гидромашин 2 для двух режимов работы гидрообъемной передачи: с регулируемой гидромашинной 1 в прямом и обратном потоках ( $e_1 = -1, \dots, 0, \dots, 1$ ) и пере-

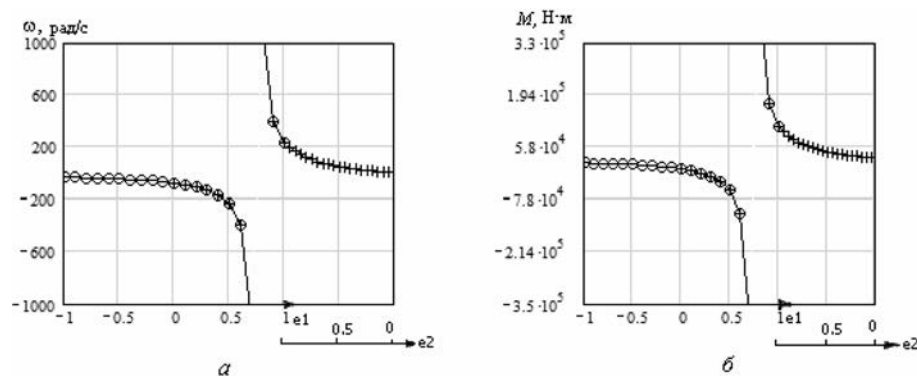


Рис. 2. Графики зависимостей: а – угловые скорости  $\omega_3$ ; б – крутящие моменты  $M_3$  на валу гидромотора с разрывом при параметре регулирования  $e_1 = 0,75$

гулируемой гидромашиной 2 ( $e_2 = 1$ ); с регулируемой гидромашиной 1 (насос) в прямом потоке ( $e_1 = 0, \dots, 1; e_2 = 1$ ) и регулируемой ( $e_1 = 1; e_2 = 0, \dots, 1$ ) гидромашиной 2 (мотор).

Угловая скорость вала, связанного с коронной шестерней и насосом соответственно его параметру регулирования  $e_1 = 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0$ , имеет значения  $\omega_2 = -235,619; -392,699; -1,178 \cdot 10^3; 1,178 \cdot 10^3; 392,699; 235,619$ . В точке  $e_1 = 0,75$  левосторонний и правосторонний пределы функции  $\omega_3 = f(e_1)$  равны  $-\infty$  и  $+\infty$  (рис. 2), т. е. функция имеет точку разрыва второго рода. Физически это означает, что ГОМТ неработоспособна.

Кроме того, схема может быть неработоспособной и в определенном интервале значений  $e_1$  вблизи точки разрыва вследствие превышения допустимых величин скоростей. Например, согласно каталогам фирмы Sauer Danfoss, максимальная угловая скорость насоса составляет 356 рад/с, гидромотора – 262–293 рад/с (соответственно с рабочим объемом  $2\pi q_2 = 110\text{--}160 \text{ см}^3$ ).

Аналогично из уравнения (13) следует зависимость  $e_{2\infty} = e_1(k-1)q_1/kq_2$  при тех же условиях, но  $e_1 = 1$ , а  $e_{2\infty}$  соответствует расчетному значению 1,333, которое не входит в интервал возможных значений параметров регулирования гидромашин.

Кроме параметров регулирования  $e_1$  и  $e_2$  в уравнении (13) есть постоянная дифференциала  $k$ , которая при изменении в диапазоне 1,4–5,0 практически не влияет на условия возникновения бесконечной скорости (соответственно  $e_{2\infty} = 0,5337\text{--}0,7624$ ). Примерно в таком же диапазоне изменяются параметры регулирования  $e_{1\infty}$  и  $e_{2\infty}$  при расчетах (по данным [6]) ГОМТ с согласующими зубчатыми передачами для двигателя и гидромашин или дифференциалов. Однако изменения максимальных рабочих объемов гидромашин  $q_1, q_2$  (например, увеличение рабочего объема гидромашин 2 до  $250 \text{ см}^3$ ) приводит к исключению условий возникновения точки разрыва в рабочем диапазоне при регулируемой гидромашине 1 и к возникновению этих условий при регулируемых обеих гидромашин. Вместе с тем увеличение практически вдвое рабочего объема гидромашин уменьшает КПД, материалоемкость и другие параметры, поэтому нецелесообразно.

Решение для второго варианта схемы с дифференциалом на входе дает при тех же исходных данных бесконечные передаточные отношения для регулируемого гидромотора при  $e_{2\infty} = 0,75$  и  $e_1 = 1$ .

Для третьего варианта при тех же исходных данных бесконечное передаточное отношение имеет место при  $e_{1\infty} = 0,25, e_2 = 1$ , но при  $k = -4,5$   $e_{1\infty} = 0,1818$ ; в четвертом варианте бесконечное передаточное отношение – для регулируемого гидромотора при  $e_{2\infty} = 0,25$  и  $e_1 = 1$   $k = -3$ . В пятом варианте бесконечные передаточные отношения не могут возникнуть при любых реальных значениях параметров регулирования  $e_1$  и  $e_2$ . Для шестого варианта бесконечные передаточные отношения могут возникнуть при  $k = -3$  и  $e_2 = 1, e_{1\infty} = -0,22$ , т. е. при обратном потоке ГОП.

В одноконтурных ГОМТ с дифференциалом на выходе бесконечные передаточные отношения звеньев возникают при регулируемой гидромашине 1 в 3 схемах из 6, а при обеих регулируемых гидромашин – в 2 схемах из 6.

**Двухконтурные схемы.** Двухконтурные схемы ГОМТ (рис. 3) подразделяются на 3 группы [8]: с параллельным соединением дифференциалов (рис. 3, а, б, в), с последовательным соединением дифференциалов (рис. 3, г, д, е) и с параллельно-последовательным соединением дифференциалов (рис. 3, ж, з). Поскольку оба дифференциала имеют по 3 звена, то их сочетания образуют 288 вариантов схем, вследствие чего расчеты становятся более сложными и громоздкими.

Кинематические характеристики двухконтурных ГОМТ описываются системами уравнений – два уравнения механические, связывающие угловые скорости основных звеньев обеих дифференциалов, и одно уравнение гидравлическое, связывающее угловые скорости роторов гидромашин. Крутящие моменты звеньев ГОМТ описываются восьмью уравнениями механики и одним гидравлическим, причем последнее преобразуются из двух уравнений (для каждой гидромашин) исключением перепада давления  $\Delta p = -M_{2a}/e_2q_2$ . Для варианта 1 двухконтурной схемы с параллельными дифференциалами и ГОП на входе, согласно рис. 3, а, системы уравнений имеют вид

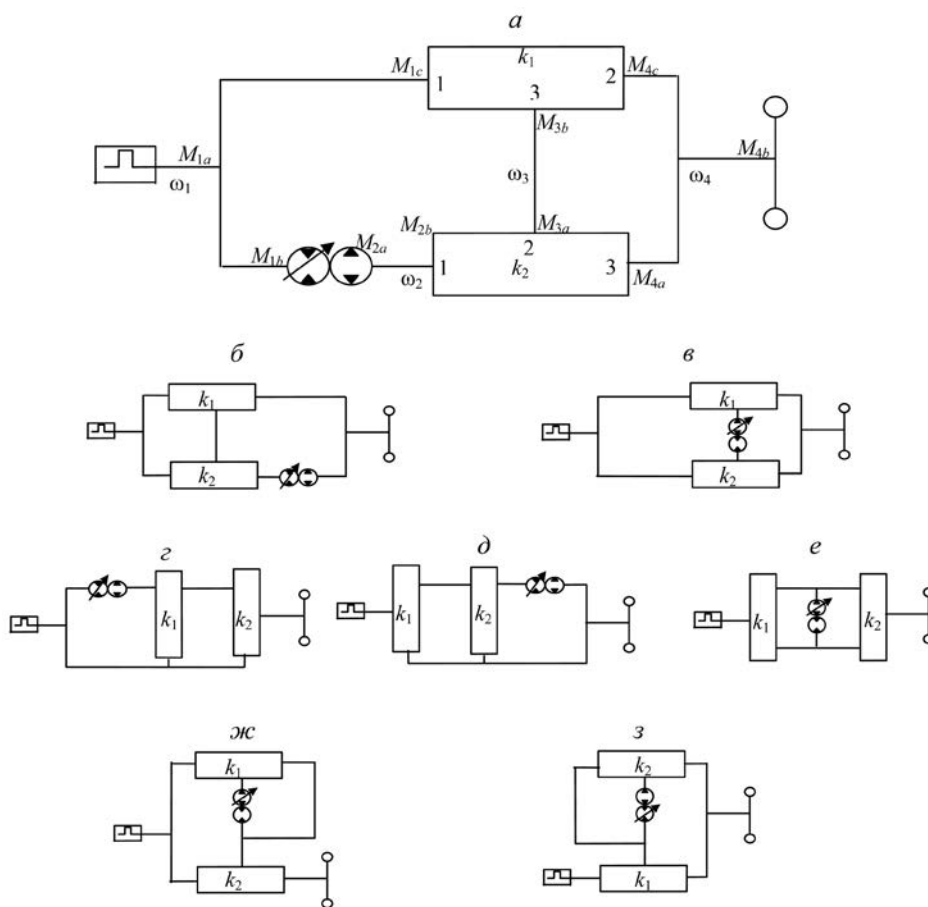


Рис. 3. Расчетная схема двухконтурной ГОМТ: *а, б, в* – параллельное соединение дифференциалов; *г, д, е* – последовательное соединение дифференциалов; *ж, з* – параллельно-последовательное соединение дифференциалов; *1* – солнечная шестерня; *2* – коронная шестерня; *3* – водило;  $k_1, k_2$  – передаточное отношение планетарного ряда соответственно дифференциала 1 и дифференциала 2;  $\omega_1, \omega_4$  – угловая скорость соответственно вала двигателя и выходного вала дифференциала;  $M_1, M_{4b}$  – крутящий момент на валу соответственно двигателя и выходного вала дифференциала; сочетания звеньев дифференциалов определяются согласно таблице

$$\begin{cases}
 M_{4c} + M_{4b} + M_{4a} = 0; \\
 M_{1a} + M_{1b} + M_{1c} = 0; \\
 M_{1c} + M_{3b} + M_{4c} = 0; \\
 M_{2b} + M_{3a} + M_{4a} = 0; \\
 M_{2b}k_2 + M_{3a} = 0; \\
 M_{1c}k_1 + M_{4c} = 0; \\
 M_{3a} + M_{3b} = 0; \\
 M_{2a} + M_{2b} = 0; \\
 M_{1b} + \frac{e_1q_1}{e_2q_2}M_{2a} = 0. \\
 \omega_1 - k_1\omega_4 + (k_1 - 1)\omega_3 = 0; \\
 \omega_2 - k_2\omega_3 + (k_2 - 1)\omega_4 = 0; \\
 e_1q_1\omega_1 - e_2q_2\omega_2 = 0,
 \end{cases} \quad (14)$$

Соответственно матрицы, составляющие уравнения (4), (6) для угловых скоростей и крутящих моментов, следующие:

$$C_\omega = \begin{vmatrix} -\omega_1 \\ 0 \\ -e_1q_1\omega_1 \end{vmatrix}; \quad K_\omega = \begin{vmatrix} 0 & k_1 - 1 & -k_1 \\ 1 & -k_2 & k_2 - 1 \\ -e_2q_2 & 0 & 0 \end{vmatrix}; \quad (15)$$

$$M = \begin{pmatrix} M_{4c} \\ M_{4a} \\ M_{1b} \\ M_{1a} \\ M_{1c} \\ M_{2a} \\ M_{3a} \end{pmatrix}; C = \begin{pmatrix} M_{4b} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; K = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_2 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & k_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \frac{e_1 q_1}{e_2 q_2} & 0 \end{pmatrix}. \quad (16)$$

Решения данных уравнений имеют вид:  
относительно угловых скоростей

$$\Omega = \begin{pmatrix} \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{e_1 q_1}{e_2 q_2} \omega_1 \\ \frac{e_1 q_1 k_1 + e_2 q_2 (k_2 - 1)}{e_2 q_2 (k_1 + k_2 - 1)} \omega_1 \\ \frac{e_2 q_2 k_2 + e_1 q_1 (k_1 - 1)}{e_2 q_2 (k_1 + k_2 - 1)} \omega_1 \end{pmatrix}, \quad (17)$$

относительно крутящих моментов

$$M = \begin{pmatrix} M_{4c} \\ M_{4a} \\ M_{1b} \\ M_{1a} \\ M_{1c} \\ M_{2a} \\ M_{3a} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2 - 1} M_{4b} \\ \frac{k_2 (k_1 - 1) - k_1 + 1}{k_1 + k_2 - 1} M_{4b} \\ \frac{e_1 q_1 (k_1 - 1)}{e_2 q_2 (k_1 + k_2 - 1)} M_{4b} \\ -\frac{e_2 q_2 k_2 + e_1 q_1 (k_1 - 1)}{e_2 q_2 (k_1 + k_2 - 1)} M_{4b} \\ \frac{k_2}{k_1 + k_2 - 1} M_{4b} \\ -\frac{k_1 - 1}{k_1 + k_2 - 1} M_{4b} \\ -\frac{k_2 (k_1 - 1)}{k_1 + k_2 - 1} M_{4b} \end{pmatrix}. \quad (18)$$

Если рассмотреть схему по варианту 2 согласно таблице, то в системах уравнений (14) изменятся уравнения, описывающие угловые скорости и крутящие моменты звеньев соответственно изменяемому дифференциалу 1. Это первое уравнение в системе скоростей –  $\omega_1 - k_1 \omega_3 + (k_1 - 1) \omega_4 = 0$  и шестое уравнение в системе моментов –  $M_{1c} k_1 + M_{3b} = 0$ . Таким образом, эти уравнения изменяются в вариантах 1–6, в варианте 7 эти уравнения опять будут, как в системах (14), но изменятся уравнения, описывающие дифференциал 2: второе уравнение в системе скоростей ( $\omega_{21} - k_2 \omega_4 + (k_1 - 1) \omega_3 = 0$ ) и пятое уравнение в системе моментов ( $-M_{2a} k_2 + M_{4a} = 0$ ). И так в каждом блоке из шести сочетаний элементов дифференциала по таблице, всего 36 вариантов.

Аналогично составляются и решаются уравнения для двухконтурных ГОМТ с параллельным соединением дифференциалов и ГОП на выходе (рис. 3, б), также с размещением ГОП между дифференциалами (рис. 3, в), по 36 вариантов, а всего 108 вариантов. С последовательным соединением дифференциалов (рис. 3, г, д, е) также насчитывается 108 вариантов схем для ГОМТ.

## Алгоритм образования вариантов схем двухконтурных ГОМТ для схемы рис. 3, а

Вариант схемы	Дифференциал 1			Дифференциал 2		
	$\omega_1$	$\omega_4$	$\omega_3$	$\omega_2$	$\omega_3$	$\omega_4$
1	1	2	3	1	2	3
2	1	3	2	1	2	3
3	2	1	3	1	2	3
4	2	3	2	1	2	3
5	3	2	1	1	2	3
6	3	1	2	1	2	3
7	1	2	3	1	3	2
...	...	...	...	...	...	...
12	3	1	2	1	3	2
13	1	2	3	2	1	3
...	...	...	...	...	...	...
18	3	1	2	2	1	3
19	1	2	3	2	3	1
...	...	...	...	...	...	...
24	3	1	2	2	3	1
25	1	2	3	3	2	1
...	...	...	...	...	...	...
30	3	1	2	3	2	1
31	1	2	3	3	1	2
...	...	...	...	...	...	...
36	3	1	2	3	1	2

Для схем ГОМТ с параллельно-последовательным соединением дифференциалов (рис. 3, ж, з) существует еще 72 схемы. К этим вариантам необходимо добавить и варианты сочетаний постоянных дифференциалов  $k_1$  и  $k_2$  в диапазоне 1,5 – 5 [8].

Для рационального количества значений постоянных  $k$  дифференциалов можно использовать ЛПт-последовательности, которые применяются для многокритериальной оптимизации. Математическая теория этих последовательностей подробно представлена например, в [10], причем доказано, что равномерность многомерной функции  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  нарушается уже при  $f(x_1, x_2)$ , если  $x_1, x_2, \dots, x_n$  разбиваются на равные интервалы. Кроме того, на следующих этапах данных исследований для выбора оптимальных параметров ГОМТ целесообразно использовать методы многокритериальной оптимизации [10]. В [10] также приводятся алгоритм и подпрограмма расчета (на языке Fortran) пробных точек для перебора значений постоянных дифференциалов  $k$ . При выборе количества пробных точек для величины  $k$  их минимум составляет 32 значения, т. е. для каждого варианта из таблицы еще 32 варианта расчетов.

Программу расчета целесообразно составлять для каждой из восьми схем двухконтурных ГОМТ (например, для схемы на рис. 3, а) для трансмиссии трактора с исходными данными, указанными выше для ГОМТ, выполненной по одноконтурной схеме, и тех же параметров регулирования гидромашин ГОП.

Посредством математической ЛПт-последовательности подпрограммой [10] рассчитываются по 32 значения постоянных  $k_1$  и  $k_2$  соответствующих дифференциалов 1 и 2. Основной расчетной частью алгоритма программы расчетов являются уравнения (14)–(18).

Для варианта 1 схемы в программу вводятся вектор-столбцы свободных членов и матрицы коэффициентов угловых скоростей (15) и крутящих моментов (16) звеньев ГОМТ. Угловые скорости звеньев рассчитываются подпрограммой по формуле (17) с составлением определителя, алгебраического дополнения и обратной матрицы коэффициентов уравнения. При этом расчет производится дважды – для схемы с нерегулируемым и обратимым гидромотором и для схемы с регулируемым гидромотором. Результаты расчетов сводятся в таблицы для контроля и анализа. Аналогично можно рассчитать и крутящие моменты звеньев по формуле (18).

Для определения вариантов схем ГОМТ, у которых функция угловой скорости звеньев имеет точку разрыва, необходим алгоритм анализа рассчитанных кинематических характеристик по

признакам деления на нуль: определитель матрицы коэффициентов (17)  $\Delta = 0$ , но это редкий случай, так как значения угловых скоростей дискретны, как и значения параметров регулирования гидромашин  $e_1$  и  $e_2$ ; угловая скорость изменяет знак вращения с плюса на минус или с минуса на плюс; при перемене знака вращения значение параметра регулирования гидромашин  $1$  не равняется нулю; абсолютная разность между значениями при перемене знака – достаточно большое число.

По этим признакам анализируется угловая скорость выходного звена. Для рассматриваемых вариантов данной схемы (рис. 3, а) это  $\omega_4$ . При совпадении этих признаков в программе вычисляются значения  $e_1$  и  $e_2$ ,  $k_1$  и  $k_2$ , соответствующие бесконечным передаточным отношениям, причем определяются дважды – для режимов с регулируемым и нерегулируемым гидромотором. Рассчитанные массивы значений сортируются по возрастанию подпрограммой по стандартному алгоритму.

Для варианта схемы 2, согласно сочетаниям звеньев дифференциалов в таблице, изменяется только первая строка в матрице коэффициентов уравнений угловых скоростей (шестая строка в матрице коэффициентов уравнений крутящих моментов). Расчет проводится по уже описанному алгоритму программы. И так 6 вариантов – первый блок. Во втором блоке вариантов и далее до шестого изменяется вторая строка в матрице коэффициентов уравнений угловых скоростей (и пятая строка в матрице коэффициентов уравнений крутящих моментов) также по таблице. Всего по данной схеме 6 блоков для 36 вариантов.

Результаты анализа условий для возникновения бесконечных передаточных отношений (скоростей и крутящих моментов) сводятся в таблицу, имеющую графы для обоих режимов регулирования гидромашин: максимальное  $e_{1\max}$  и минимальное  $e_{1\min}$  значения параметра регулирования гидромашин; значения постоянных  $k_1$  и  $k_2$  при  $e_{1\max}$  и  $k_1, k_2$  при  $e_{1\min}$ .

**Результаты исследований и их анализ.** В схемах двухконтурных ГОМТ с параллельным соединением дифференциалов и ГОП на входе (рис. 3, а) нет условий для возникновения бесконечных угловых скоростей звеньев. Однако при  $k_1 = k_2$  варианты схем 2, 7, 16, 21, 30, 35, в которых одноименные звенья дифференциалов попарно связаны между собой напрямую или через ГОП, неработоспособны.

В схемах с ГОП на выходе (рис. 3, б) в режиме регулирования только насоса условия для бесконечных передаточных отношений возникают в 22 вариантах: 2, 4, 5, 7, 8, 10, 11, 16, 17, 19, 20, 21, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 34, 35 и из них 10 вариантов при обратном потоке, т. е.  $e_{1\infty} < 0$ : 5, 11, 17, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 34. В режиме регулирования обеих гидромашин условия для бесконечных передаточных отношений возникают в тех же вариантах при  $e_{1\infty} > 0$  и добавляются варианты, удовлетворяющие  $e_{2\infty}$  (1, 3, 9, 13, 14, 36), причем в вариантах 3, 13, 36 можно исключить схемы с некоторыми сочетаниями  $k_1$  и  $k_2$ , так как  $e_{2\infty} < 0,3$ .

В схемах с ГОП, расположенной между дифференциалами (рис. 3, в) в режиме регулирования одной гидромашин, условия для бесконечных угловых скоростей отмечаются в 23 вариантах (практически тех же, что и в предыдущей схеме) с добавлением 22-го варианта. Аналогично неработоспособны варианты схем в режиме регулирования обеих гидромашин. Всего по этой схеме с регулируемой гидромашинной 1 без возникновения бесконечных значений передаточных отношений могут работать 13 вариантов, а с регулируемыми обеими гидромашинными – 20 вариантов.

В схемах ГОМТ с последовательным соединением дифференциалов и ГОП на входе (рис. 3, г) у всех вариантов условия для бесконечных угловых скоростей не отмечаются при любых значениях параметров.

В схемах с последовательным соединением дифференциалов и ГОП на выходе (рис. 3 д) в режиме регулирования только гидромашинной 1 условия для возникновения бесконечных передаточных отношений отмечены в 29 вариантах схем, а в режиме регулирования обеих гидромашин – у 26 вариантов.

В схемах с последовательным соединением дифференциалов и ГОП, расположенной между дифференциалами (рис. 3, е) в режиме регулирования только насоса, условия для бесконечных передаточных отношений отмечены в 18 вариантах схем, в режиме регулирования обеих гидромашин – в 24 вариантах.

В схемах ГОМТ с параллельно-последовательным соединением дифференциалов, расположенных на входе (рис. 3, ж) и работающих в режиме регулирования только одной гидромашинной

ны, условия для возникновения бесконечных передаточных отношений отмечены в 19 вариантах схем. В режиме регулирования обеих гидромашин условия для бесконечных передаточных отношений могут иметь место при прямом потоке гидромашины 1 (13 вариантов) и гидромашины 2 (12 вариантов), всего 25.

В схемах ГОМТ с параллельно-последовательным соединением дифференциалов, расположенных на выходе (рис. 3, з) и работающих в режиме регулирования только одной гидромашин, условия для бесконечных передаточных отношений отмечены в 16 вариантах схем. В режиме регулирования обеих гидромашин – 24 варианта, кроме вариантов, где  $e_{2\infty} < 0,3$ .

Таким образом, можно считать работоспособными по критерию соответствия угловых скоростей звеньев трансмиссии допустимым значениям 161 из 288 вариантов схем при регулируемой гидромашине 1 и 158 из 288 при обеих регулируемых гидромашинах 1 и 2.

**Заключение.** Проведенные по разработанным методикам, алгоритмам и программам расчеты кинематических и статических характеристик ГОМТ позволили установить аналитические зависимости для определения точек разрыва второго рода функции угловых скоростей звеньев от параметров регулирования, рабочего объема гидромашин, передаточного отношения планетарного ряда дифференциалов. Поэтому для обеспечения работоспособности трансмиссий конструкторскую проработку ГОМТ следует основывать на расчетно-аналитической оценке соответствия угловых скоростей звеньев трансмиссий их допустимым значениям.

Существование точек разрыва функции угловых скоростей определяет условия потери работоспособности ГОМТ в результате превышения допустимых значений угловых скоростей их звеньев.

Применительно к ГОМТ, близкой по своим характеристикам к трансмиссии трактора тягового класса 4, данный метод позволяет исключить из рассмотрения 5 из 24 вариантов одноконтурных и 257 из 576 вариантов двухконтурных схем.

### Список использованных источников

1. Дубовик, Д. А. Основные направления развития автотракторокомбайностроения / Д. А. Дубовик, О. М. Еловой, Л. Ю. Бакалова; Объед. ин-т машиностроения Нац. акад. наук Беларуси. – Минск, 2014 – 176 с. – деп. в ГУ БелИСА 17.07.2014 № Д201411.
2. Выбор типа и параметров современной тракторной трансмиссии / П. А. Амельченко [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. – 2013. – № 8. – С. 14–19
3. Дубовик, Д. А. Снижение затрат многоприводных колесных машин путем совершенствования механических приводов ведущих колес: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Могилев, 2012. – 44 с.
4. Таран, И. А. Трансмиссии шахтных дизелевозов: моногр. / И. А. Таран. – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2012. – 256 с.
5. Методика уточнения математической модели объемного КПД аксиально-поршневых гидронасосов / В. Б. Самородов, [и др.] // Сб. науч. тр. “Вестник НТУ “ХПИ”: Автомобиле- и тракторостроение № 58. – Вестник НТУ “ХПИ”, – 2008. – С. 3–10.
6. Самородов, В. Б. Сравнительный анализ бесступенчатых двухпоточных гидрообъемно-механических трансмиссий / В. Б. Самородов, А. И. Бондаренко // Вестник Харьковского автомобильно-дорожного университета: сб. науч. тр. – Харьков: – 2012. Вып. 56. – С. 37–45.
7. Самородов, В. Б. Анализ бесступенчатых двухпоточных гидрообъемно-механических тракторных трансмиссий: выбор и обоснование перспективных схем / В. Б. Самородов, О. В. Григоров, А. И. Бондаренко // Сб. науч. тр. “Вестник НТУ “ХПИ”: Транспортное машиностроение» № 20. – Вестник НТУ “ХПИ”, 2012. – С. 24–46.
8. Петров, В. А. Гидрообъемные трансмиссии самоходных машин / В. А. Петров. – М.: Машиностроение, 1988. – 248 с.
9. Объемные гидромеханические передачи: расчет и конструирование / О. М. Бабаев [и др.] – Л.: Машиностроение, 1987. – 256 с.
10. Соболев И. М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями / И. М. Соболев, Р. Б. Статников. – М.: Наука, 1981. – 112 с.

### References

1. Doubovik, D. A., Elovoy, O. M. and Bakalova, L. Ju. (2014), *Osnovnye napravleniya razvitiya avtotraktorokombainostroeniya* [Main directions of development of the automobile, tractor and harvester engineering], Dep. in BelISA 17.07.2014 no. D201411, Ob'edinennyi institut mashinostroeniya Natsional'noi akademii nauk Belarusi, Minsk, BY.

2. Amel'chenko, P. A., Dubovik, D. A., Zhukovskii, I. N., Klyuchnikov, A. V. and Zhukovskii, A. I. (2013), "Select the type and parameters of modern tractor transmissions", *Traktory i sel'khoz mashiny* [Tractors and Agricultural Machinery], no. 8, pp. 14–19.
3. Dubovik, D. A. (2012), "Decreasing of expenditure of energy of multi-wheel drive vehicles by perfection of mechanical drives of driving wheels", Abstract of D. Sc. Dissertation, Wheeled and tracked vehicles, State Institution of Higher Professional Education "Belarusian-Russian University", Mogilev, BY.
4. Taran, I. A. (2012), *Transmissii shakhtnykh dizelevozzov* [Transmissions of mine diesel locomotives], Nacional'nyj gornyj universitet, Dnepropetrovsk, UA.
5. Samorodov, V. B., Burlyga, M. B., Koval', A. A., Rogov, A. V. and Samorodov, B. V. (2008), "Methodology of refinement of mathematical models volumetric efficiency axial-piston hydraulic pumps", *"Automobile- ta traktorobuduvannya": Visnik NTU "KhPI"* ["Automobile and tractor." Vestnik NTU "HPI"], no. 58, pp. 3–10.
6. Samorodov, V. B. and Bondarenko, A. I. (2012), "Comparative analysis of the continuously variable double-split hydrostatic mechanical transmissions", Sb. nauch. tr. "Vestnik Har'kovskogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta" [Collection of scientific works "Bulletin of the Kharkov Automobile and Road University"], HNADU, Har'kov, UA, vol. 56, pp. 37–45.
7. Samorodov, V. B., Grigorov, O. V. and Bondarenko, A. I. (2012), "Analysis of double-split continuously variable hydrostatic-mechanical tractor transmissions: selection and justification of promising schemes", "Transportnoe mashinostroenie": Vestnik NTU KhPI [Transport engineering: Herald NTU KPI], no. 20, pp. 24–46.
8. Petrov, V. A. (1988), *Gidroob'emnye transmissii samokhodnykh mashin* [Hydrostatic transmissions for self-propelled machines], Mashinostroenie, Moscow, RU.
9. Babaev, O. M., Ignatov, L. N., Kistochkin, E. S., Sokolov, G. S. and Tsvetkov, V. A. (1987), *Ob'emnye gidromekhanicheskie peredachi: raschet i konstruirovaniye* [Volume hydromechanical transmissions: calculation and design], Mashinostroenie, Leningrad, RU.
10. Sobol', I. M. and Statnikov, R. B. (1981), *Vybor optimal'nykh parametrov v zadachakh so mnogimi kriteriyami* [Choosing the optimal parameters in problems with many criteria], Nauka, Moscow, RU.

#### Информация об авторах

Дубовик Дмитрий Александрович – доктор технических наук, директор научно-технического центра «Машиностроение». Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси (220072, г. Минск, ул. Академическая, 12, Беларусь). E-mail: ddubovik@tut.by

Прибыльский Валерий Иванович – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник. Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси (220072, г. Минск, ул. Академическая, 12, Беларусь). E-mail: pribylskiy 49 @ mail.ru

#### Для цитирования

Дубовик, Д. А. Гидрообъемно-механические трансмиссии мобильных машин. Расчет кинематических и силовых параметров / Д. А. Дубовик, В.И. Прибыльский // Вест. Нац. акад. наук. Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2016. – № 4. – С. 61–72.

#### Information about the authors

Dubovik Dmitrii Aleksandrovich – D.Sc. (Engineering), Center director, Scientific and technical Center "Mechanical Engineering". The Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (12, Akademicheskaya str., 220072, Minsk, Belarus). E-mail: ddubovik@tut.by

Pribylski Valery Ivanovich – Ph.D. (Engineering), Assistant Professor, Leading Reasercher. The Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (12, Akademicheskaya str., 220072, Minsk, Belarus). E-mail: pribylskiy 49 @ mail.ru

#### For citacion

Dubovik D. A., Pribylski V. I. Hydrostatic-mechanical transmissions of mobile machines. Calculation of kinematic and force parameters. Proceedings of the National academy of sciences of Belarus, physical-technical series. 2016, no. 4, pp. 61–72.



**В. Я. Груданов, А. Б. Торган, Л. Т. Ткачева**

*Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Беларусь,*

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ФОРМОВАНИЯ  
МАКАРОННЫХ ИЗДЕЛИЙ В КАНАЛАХ МАТРИЦ  
СТУПЕНЧАТО-ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ**

В настоящее время неравномерность скоростей формования макаронных изделий по сечению матрицы является не решенной проблемой как в отечественной, так и в зарубежной практике.

Конструкция матрицы является одним из определяющих факторов, влияющим на технико-экономические показатели работы пресса. Матрица включает в себя цилиндрический корпус с колодцами, расположенными на концентрических окружностях, установленные внутри колодцев вкладыши со сквозными формующими отверстиями, сгруппированными в гнезда.

Цель статьи – разработка методики и установление соотношения между пластичной и вязкой составляющими общего гидродинамического сопротивления при течении макаронного теста в канале ступенчато-переменного сечения. Разработана методика определения минимального давления формования, необходимого для преодоления предела текучести при сдвиге (предельного сопротивления сдвигу) макаронной тестовой массы, находящейся в каналах кругового, кольцевого, прямоугольного и произвольного сечений. Выполнена расчетная оценка этого давления при формовании тестовой массы первого и высшего сорта, а также теста на основе полукрупки для промышленно используемых типоразмеров каналов ступенчато-переменного сечения. Показано, что в общем гидродинамическом сопротивлении преобладает вклад составляющей, обусловленной вязким сдвиговым деформированием при течении. Предложена методика приближенной расчетной оценки скоростных и силовых параметров течения тестовой массы в каналах ступенчато-переменного сечения с применением модели Бингама. Результаты исследований могут быть использованы при проектировании формующей оснастки, а также при разработке методов расчета процессов формования макаронной тестовой массы.

*Ключевые слова:* макаронная тестовая масса, формование, канал, течение, сопротивление, давление, скорость, производительность.

**V. Ya. Grudanov, A. B. Torhan, L. T. Tkachyova**

*Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Belarus*

**MODELING AND OPTIMIZATION OF PROCESSES OF SHAPING OF PASTAS  
IN CHANNELS OF MATRICES OF STEP-VARIABLE SECTION**

Currently velocity unevenness of forming pasta matrix over the cross section is an unsolved problem, both in domestic and in international practice.

The construction of the matrix is one of the key factors influencing technical and economic indicators of pressing work. The matrix includes a cylindrical body with wells located on concentric circles, liners mounted within wells, shaping with through holes that are grouped in the nests.

The aim of the work was to develop a methodology and establish it by the ratio between plastic and viscous components of the total hydrodynamic resistance in the flow of pasta dough in the channel of step-variable cross-section. The technique of determining the minimum pressure of the molding that is required to overcome the yield stress in shear (ultimate shear resistance) pasta in the channel of circular, annular, rectangular and arbitrary cross-sections, is developed. Computational evaluation of this pressure in the molding of the dough of first and higher grades and test on the basis of polyrope used for industrial types and sizes of channels with stepped variable cross-section is made. It is shown that in general the hydrodynamic resistance is dominated by the contribution of the component due to viscous shear deformation in the course. An approximate method of estimating the speed and power of flow parameters pasta in the channels of step-variable cross section using the model of Bingham is proposed. The research results can be used in the design of the forming equipment, as well as in the development of methods of calculation of processes of formation and pasta dough.

*Keywords:* pasta dough, molding, channel, current, resistance, pressure, velocity, performance.

**Введение.** Совершенствование теории и методов расчета формующего оборудования является задачей, решение которой обеспечит оптимальное конструирование его узлов с целью получения продукции требуемого качества. В связи с этим возникает потребность в математическом моделиро-

вании процесса формирования, высокая значимость которого отмечается многими современными учеными.

Основные цели математического моделирования формирования состоят в углублении физического (качественного) понимания процесса и в его количественном описании с максимально возможным приближением к реальной технологической практике.

Значительный вклад в развитие математических моделей и методов расчета дозирующих зон одношнековых экструдеров внесли основоположники теории переработки полимеров G. Schenkel, V. Elbirly, H. Potente, J. Martin и др. [1–4].

Работу одношнековых прессов для пищевых производств изучали J. P. Melcion, J. L. Rossen, Н. И. Назаров, Ю. А. Мачихин, А. В. Горбатов и др. [5–8].

Фундаментальные исследования сложных явлений, происходящих при движении макаронного теста в прессующем корпусе и каналах матрицы, на которых базируется теория макаронного теста, проведены Н. Н. Назаровым, Ю. А. Мачихиным [8, 9, 12].

Процессы формирования макаронной тестовой массы широко распространены в пищевой промышленности при производстве сплошных (вермишель, лапша, спагетти) и полых (макаронные трубки, рожки) изделий. При этом тесто требуемого состава и влажности захватывается напорным шнеком и последовательно проходит через четыре условно выделяемых участка прессующего устройства (рис. 1): загрузка и транспортирование (*I*), уплотнение (*II*), перемещение спрессованного теста по виткам шнека (*III*), нагнетание и выпрессовывание через формующие отверстия матрицы (*IV*) [10, 11].

Как правило, отверстия матрицы имеют ступенчато-переменное [12] или плавноизменяющееся сечение (по патенту на изобретение РБ № 13326), уменьшающееся от входа в матрицу до выхода из нее, где обычно устанавливается формующая фильера.

Несмотря на широкую распространенность таких процессов, силовые и кинематические параметры течения теста в отверстиях матрицы и фильерах изучены только в простейшей эмпирической постановке для частных случаев формирования отдельных видов изделий из стандартного теста определенного состава на матрицах ограниченного типоразмера. Вопрос о возможности переноса имеющихся результатов на другие типоразмеры изделий, составы тестовой массы или режимы формирования (давление, скорость) остается открытым. Полученные технические достижения по оптимизации конструкции каналов представляют собой предмет патентной защиты. Отмеченные выше недостатки обусловлены слабой теоретической разработанностью процессов сдвигового деформирования тестовой массы в каналах изменяющегося сечения.

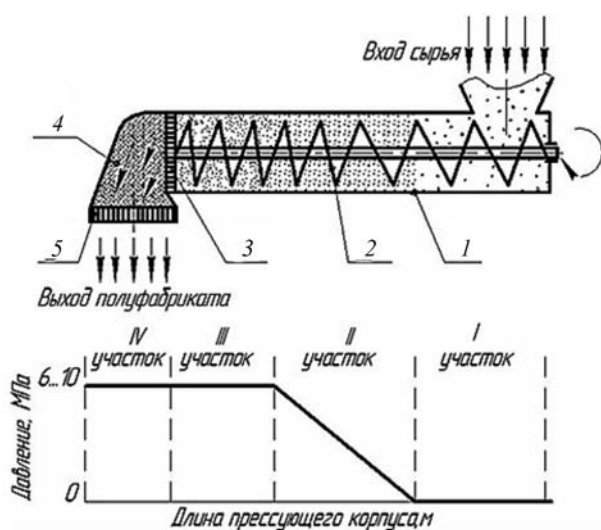


Рис. 1. Схема прессующего устройства для формирования макаронной тестовой массы: 1 – корпус; 2 – шнек; 3 – перфорированная решетка; 4 – предматричная камера; 5 – матрица

В научно-технической литературе существуют отдельные подходы, основанные на том, что тестовая масса ведет себя подобно вязкопластичной жидкости Бингама, без тщательной проверки этой гипотезы и без выяснения вклада пластичной и вязкой составляющих в общее гидродинамическое сопротивление при течении теста в каналах ступенчато-переменного сечения.

**Предварительные данные.** Основными величинами, характеризующими режим формирования, являются давление, оказываемое рабочими органами пресса на тесто, и скорость выпрессовывания изделий. Давление в предматричной камере обусловлено сопротивлением тестовой массы, которое оказывают его истечению формующие отверстия матрицы. Величина давления, как и скорость прессования, является функцией многих факторов: консистенция теста, конфигурация формующих отверстий, характер течения в отверстиях и т. д. Скорость

и давление зависят от температуры и влажности теста (от его вязкопластичных свойств), состояния поверхности формирующих элементов матрицы и многих других факторов, связанных со свойствами исходного сырья, расходуемого на приготовление макаронного теста.

Для вязкопластичной среды, какой является тестовая масса, характерно наличие сдвиговой прочности материала  $\tau_0$ . Если значения касательных напряжений  $\tau$  меньше, чем величина сдвиговой прочности материала  $\tau_0$ , то сдвиг в объеме материала отсутствует, скорость течения равна нулю. Из этого следует, что существует минимальное значение напряжения сдвига, а соответственно и минимальное давление формования  $P_{\min}$ , ниже которого течение невозможно. Определим величину этого давления. Будем считать, что касательные напряжения на стенках канала равны сдвиговой прочности макаронного теста  $\tau_0$ .

Для начала сдвигового деформирования, а соответственно начала течения тестовой массы, в канале матрицы необходимо, чтобы величина усилия проталкивания была не меньше, чем значение суммарного сопротивления от касательных напряжений  $\tau_w$  на боковых стенках. При этом учитываем, что усилие проталкивания равно произведению минимального давления формования  $P_{\min}$  на площадь сечения канала, а сопротивление от касательных напряжений  $\tau_w$  равно произведению на периметр сечения канала и длину участка.

С использованием такого подхода для наиболее распространенных типов каналов длиной  $l$ , пренебрегая входными эффектами, получаем следующие уравнения:

канал кругового сечения диаметром  $d$  (применяется при производстве вермишели, спагетти):

$$P_{\min} \geq \frac{4\tau_0 l}{d_k}, \quad (1)$$

канал кольцевого сечения с внешним диаметром  $D$ , внутренним диаметром  $d$  (применяется при производстве рожков, трубчатых макаронных изделий):

$$P_{\min} \geq \frac{4\tau_0 l}{D_{\text{кол}} - d_{\text{кол}}}, \quad (2)$$

канал прямоугольного сечения шириной  $b$  и высотой  $h$  (применяется при производстве лапши):

$$P_{\min} \geq \frac{2\tau_0 l(b+h)}{bh}, \quad (3)$$

канал для формования фигурных макаронных изделий площадью сечения  $s$  и периметром  $u$ :

$$P_{\min} \geq \frac{\tau_0 ul}{s}. \quad (4)$$

Для канала ступенчато-переменного сечения с диаметром каждой ступени  $d_i$  и длиной ступени  $L_i$  суммарное сопротивление  $n$  участков будет равно сумме сопротивлений на каждом из них (без учета входных эффектов):

силовые условия начала течения макаронного теста:

$$P \frac{\pi d_{\text{отв}}^2}{4} \geq \sum_{i=1}^n \pi d_i L_i \tau_0, \quad (5a)$$

минимальное давление  $P_{\min}$ , необходимое для начала течения:

$$P_{\min} \geq \frac{4\tau_0}{d_{\text{отв}}^2} \sum_{i=1}^n d_i L_i, \quad (5b)$$

где  $D_{\text{в}}$  – диаметр входного отверстия канала, м.

Полученные формулы (1)–(5) могут быть использованы для анализа влияния размеров формирующих элементов на минимальное давление формования. В качестве примера в табл. 1 приведены расчетные значения потерь давления на преодоление предельного сопротивления сдвигу  $\tau_0$  различных видов макаронной тестовой массы с содержанием влаги 30% при давлении 4,9 МПа и температуре 40 °С в отверстиях матрицы ступенчато-переменного сечения (рис. 2, а).

Таблица 1. Расчетные потери давления на преодоление предельного сопротивления сдвигу  $\tau_0$  макаронного теста влажностью 30% в каналах ступенчато-переменного сечения при температуре 40 °С и давлении 4,9 МПа

Мука для тестовой массы	Предельное сопротивление сдвигу $\tau_0$ , кПа[5]	Потери давления по ступеням, кПа				Суммарные потери давления, кПа
		1-я ступень, $d_1=23$ мм, $L_1=32$ мм	2-я ступень, $d_2=21$ мм; $L_2=29$ мм	3-я ступень, $d_3=20$ мм, $L_3=26$ мм	4-я ступень, $d_4=18$ мм, $L_4=23$ мм	
Высший сорт	3,28	18,25	18,12	17,06	16,76	70,19
Первый сорт	5,60	31,17	30,93	29,12	28,62	119,84
На основе полукрупки	15,0	83,48	82,86	78,0	76,67	321,01

Примечание. При увеличении температуры происходит уменьшение предельного напряжения сдвига (сдвиговой прочности) материала (в частности, для муки первого сорта при 18 °С – 18300 Па, при 40 °С – 5600 Па, при 56 °С – 2100 Па).

Сравнение полученных значений с применяемым на практике давлением формования  $p = 6\text{--}10$  МПа (6000–10 000 кПа) показывает, что вклад потерь давления на преодоление предельного сопротивления сдвигу в отверстиях матрицы в общие потери давления незначительный. Следовательно, основные потери давления направлены на преодоление сопротивления вязкому течению в подводящих каналах и фильерах матрицы, что должно быть положено в основу соответствующих реологических расчетов.

**Построение математической (реологической) модели.** Рассмотрим скоростные параметры процесса формования. Если давление формования  $P$  будет больше, чем  $P_{\min}$ , то начнется вязкопластичное течение материала. Определим перепад давлений в ступенчатом канале на длине  $dx$   $i$ -го участка (рис. 2, а).

Выделим в ступенчатом канале элемент длиной  $dx$ , радиусом  $R_i$  и длиной  $L_i$  (рис. 2, а) и рассмотрим условия его равновесия (рис. 2, б). Справа на него действует давление  $P_i$ , слева – давление  $(P_i + dP_i)$ , на поверхности стенки канала касательные напряжения  $\tau_{wi}$ . Запишем уравнение равновесия элемента в проекции на ось  $X$ :

$$(P_i + dP_i)\pi R_i^2 - P_i\pi R_i^2 - \tau_{wi} 2\pi R_i dx = 0. \quad (6)$$

Выразим из уравнения (6) прирост  $dP_i$  давления на длине  $dx$ :

$$dP_i = \frac{2\tau_{wi}}{R_i} dx. \quad (7)$$

Полный перепад давления на участке длиной  $L_i$  получим интегрированием уравнения (7):

$$\Delta P_i = \frac{2\tau_{wi}}{R_i} L_i. \quad (8)$$

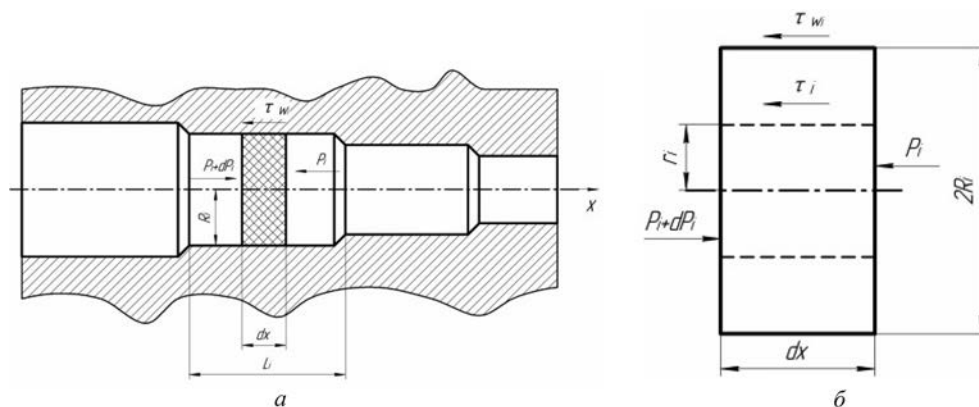


Рис. 2. Расчетная схема для определения параметров течения макаронного теста: а – ступенчатый канал; б – напряжения, действующие на элемент длиной  $dx$  и радиусом  $R_i$ ;  $P_i$  – осевое давление;  $dP_i$  – прирост давления формования;  $\tau_{wi}$  и  $\tau_i$  – касательные напряжения на стенках канала и на элементе длиной  $dx$ ;  $R_i$  – радиус канала  $i$ -й ступени;  $r_i$  – радиус элемента длиной  $dx$ ;  $L_i$  – длина  $i$ -го участка ступенчатого канала

Найдем распределение касательных напряжений  $\tau_i$  по радиусу канала. Выделим элемент длиной  $dx$  и радиусом  $r_i$  в элементарном объеме и рассмотрим условия его равновесия (рис. 2, б). Справа на него действует давление  $P_i$ , слева – давление  $(P_i + dP_i)$ , на поверхности цилиндра касательные напряжения  $\tau_i$ . Из условия равновесия проекций на ось  $X$  получим

$$(P_i + dP_i)\pi r_i^2 - P_i\pi r_i^2 - \tau_i 2\pi r_i dx = 0. \quad (9)$$

Выразим из уравнения (9) прирост давления  $dP_i$ :

$$dP_i = \frac{2\tau_i}{r_i} dx. \quad (10)$$

Поскольку формулы (7) и (10) описывают один и тот же участок (одно сечение), то из равенства элементарных приращений давления  $dP_i$  (левые части уравнения) следует равенство их правых частей, откуда после преобразований получаем

$$\tau_i = \tau_{wi} \frac{r_i}{R_i}. \quad (11)$$

Из аналитической зависимости (11) видно, что касательные напряжения линейно возрастают вдоль радиуса.

Примем в первом приближении в соответствии с рекомендациями [1], что тестовая масса подчиняется закону вязкого течения Бингама:

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma}, \quad (12)$$

где  $\tau$  – касательные напряжения на площадках сдвига, МПа;  $\tau_0$  – сдвиговая прочность материала, МПа;  $\mu$  – динамическая вязкость, Па·с;  $\dot{\gamma}$  – скорость сдвига,  $\text{с}^{-1}$ .

Анализ зависимостей (11), (12) показывает, что при течении тестовой массы в канале будут две зоны (рис. 3). В зоне 1 на периферии канала касательные напряжения  $\tau$  будут больше сдвиговой прочности материала  $\tau_0$ . Следовательно, в этой зоне будет реализовываться сдвиговое течение теста. Зона 2 («ядро течения») располагается вблизи оси канала. В ней при  $\tau < \tau_0$  материал будет двигаться с постоянной скоростью.

Рассмотрим схему выпрессовывания макаронных изделий и найдем взаимосвязь скорости течения и производительности канала с перепадом давления на  $i$ -м участке.

Учтем, что скорость течения  $v$  связана со скоростью сдвига  $\dot{\gamma}$  следующей зависимостью:

$$\dot{\gamma}_i = -\frac{dv_i}{dr_i}. \quad (13)$$

Выразим из уравнения (12) скорость сдвига:

$$\dot{\gamma}_i = \frac{\tau - \tau_0}{\mu}. \quad (14)$$

Из формулы (8) через перепад давления  $\Delta P_i$  и размеры участка  $L_i$  и  $R_i$  найдем касательные напряжения на стенке канала  $\tau_{wi}$ :

$$\tau_{wi} = \frac{\Delta P_i R_i}{2L_i}. \quad (15)$$

Подставив значение  $\tau_{wi}$  из уравнения (15) в (11), получим аналитическую зависимость, описывающую распределение касательных напряжений  $\tau_i$  по радиусу канала:

$$\tau_i = \frac{\Delta P_i r_i}{2L_i}. \quad (16)$$

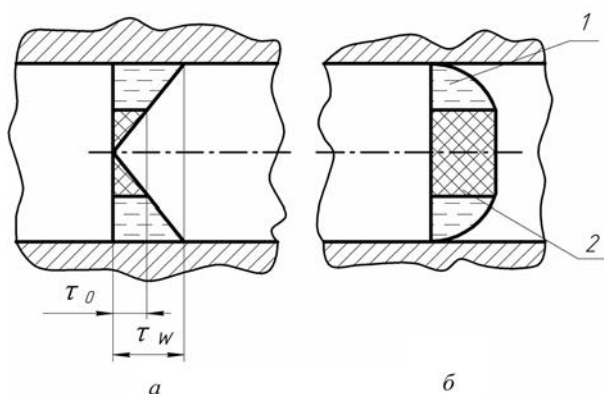


Рис. 3. Схема распределения касательных напряжений (а) и скоростей течения (б) макаронной тестовой массы в канале круглого сечения: 1 – зона сдвигового деформирования (зона 1); 2 – «ядро течения» (зона 2);  $\tau_w$  – касательное напряжение на стенках канала;  $\tau_0$  – сдвиговая прочность материала (касательные напряжения на границе раздела зон)

Для градиента скорости, подставив  $\tau$  из уравнения (16) в (14) с учетом (13), найдем

$$-\frac{dv_i}{dr_i} = \frac{\Delta P_i r_i}{2\mu L_i} - \frac{\tau_0}{\mu}. \quad (17)$$

Проинтегрируем выражение (17) с граничными условиями  $v = 0$  при  $r_i = R_i$  и получим аналитическую зависимость для распределения скорости формирования по зоне сдвига  $l$ :

$$v_i = \frac{\Delta P_i}{4\mu L_i} (R_i^2 - r_i^2) - \frac{\tau_0}{\mu} (R_i - r_i). \quad (18)$$

Найдем радиус  $r_{0i}$ , характеризующий положение границы раздела зон  $l$  и  $2$  фильеры формирующего канала. На границе раздела (при  $r = r_0$ ) касательные напряжения  $\tau = \tau_0$ . Тогда с учетом выражения (16) запишем

$$r_{0i} = \frac{2\tau_0 L_i}{\Delta P_i}. \quad (19)$$

Определим максимальную скорость формирования  $v_{\max}$ , которая может быть получена из (18) при  $r = r_{0i}$ :

$$v_{\max} = \frac{\Delta P_i}{4\mu L_i} \left( R_i^2 - \frac{4\tau_0^2 L_i^2}{\Delta P_i^2} \right) - \frac{\tau_0}{\mu} \left( R_i - \frac{2\tau_0 L_i}{\Delta P_i} \right) = \frac{\Delta P_i}{4\mu L_i} (R_i^2 - r_{0i}^2) - \frac{\tau_0}{\mu} (R_i - r_{0i}). \quad (20)$$

Вычислим расход тестовой массы при течении в канале. Он будет складываться из расходов в зонах  $l$  и  $2$ . Для зоны  $l$  сдвигового течения элементарный расход  $dQ_{1i}$  может быть вычислен как произведение скорости  $v$  в данном сечении на элементарную площадь:

$$dA = 2\pi r_i dr.$$

Тогда с учетом выражения (18) получим

$$dQ_{1i} = 2\pi r_i v dr = 2\pi \left[ \frac{\Delta P_i}{4\mu L_i} (R_i^2 r_i - r_i^3) - \frac{\tau_0}{\mu} (R_i r_i - r_i^2) \right] dr. \quad (21)$$

Проинтегрируем выражение (21) в пределах от  $r_{0i}$  до  $R_i$  и определим расход тестовой массы для зоны  $l$ :

$$Q_{1i} = \int_{r_{0i}}^{R_i} 2\pi \left[ \frac{\Delta P_i}{4\mu L_i} (R_i^2 r_i - r_i^3) - \frac{\tau_0}{\mu} (R_i r_i - r_i^2) \right] dr = \frac{\pi \Delta P_i}{8\mu L_i} (R_i^2 - r_{0i}^2)^2 - \frac{\pi \tau_0}{3\mu} [R_i^3 - 3R_i r_{0i}^2 + 2r_{0i}^3]. \quad (22)$$

Расход для зоны  $2$  получим умножением скорости  $v_{\max}$  на площадь «ядра течения»:

$$Q_{2i} = \pi r_{0i}^2 v_{\max} = \pi r_{0i}^2 \left[ \frac{\Delta P_i}{4\mu L_i} (R_i^2 - r_{0i}^2) - \frac{\tau_0}{\mu} (R_i - r_{0i}) \right]. \quad (23)$$

Суммарный расход  $Q_i$  найдем как сумму расходов  $Q_{1i}$  и  $Q_{2i}$  на данном участке:

$$Q_i = \frac{\pi \Delta P_i}{8\mu L_i} (R_i^2 - r_{0i}^2)^2 - \frac{\pi \tau_0}{3\mu} [R_i^3 - 3R_i r_{0i}^2 + 2r_{0i}^3] + \pi r_{0i}^2 \left[ \frac{\Delta P_i}{4\mu L_i} (R_i^2 - r_{0i}^2) - \frac{\tau_0}{\mu} (R_i - r_{0i}) \right]. \quad (24)$$

Подставив значение  $r_{0i}$  из уравнения (19), получим аналитическую зависимость, связывающую перепад давления  $\Delta P_i$  и размеры участка  $L_i$  и  $R_i$ :

$$Q_i = \frac{\pi \Delta P_i}{8\mu L_i} \left( R_i^2 - \frac{4\tau_0^2 L_i^2}{\Delta P_i^2} \right)^2 - \frac{\pi \tau_0}{3\mu} \left[ R_i^3 - 3R_i \frac{4\tau_0^2 L_i^2}{\Delta P_i^2} + \frac{16\tau_0^3 L_i^3}{\Delta P_i^3} \right] + \frac{4\pi \tau_0^2 L_i^2}{\Delta P_i^2} \left[ \frac{\Delta P_i}{4\mu L_i} \left( R_i^2 - \frac{4\tau_0^2 L_i^2}{\Delta P_i^2} \right) - \frac{\tau_0}{\mu} \left( R_i - \frac{2\tau_0 L_i}{\Delta P_i} \right) \right]. \quad (25)$$

Данные формулы и методика справедливы для  $P \geq P_{\min}$ , т.е. когда реализуется вязкопластичное течение. В разных литературных источниках приводятся сведения о реологических (структурно-ме-

ханических) характеристиках тестовой массы, например [7]. Для макаронной тестовой массы в зависимости от температуры, вида сырья и влажности такие сведения приведены в табл. 2–4.

**Т а б л и ц а 2. Зависимость пластической вязкости  $\eta_{пл}$  макаронного теста от температуры и скорости сдвига  $\dot{\gamma}$  при влажности теста 30% и давлении 4,9 МПа**

Температура тестовой массы, °С					
18		40		56	
Скорость сдвига $\dot{\gamma}$ , с <sup>-1</sup>	Вязкость $\eta_{пл}$ , кПа·с	Скорость сдвига $\dot{\gamma}$ , с <sup>-1</sup>	Вязкость $\eta_{пл}$ , кПа·с	Скорость сдвига $\dot{\gamma}$ , с <sup>-1</sup>	Вязкость $\eta_{пл}$ , кПа·с
0,040	2390	0,020	1140	0,035	348
0,069	1780	0,098	420	0,208	102
0,107	1360	0,280	232	0,552	55
0,189	893	0,530	165	0,860	47
0,365	528	0,890	125	1,230	36
0,607	355	1,440	94	1,720	29

**Т а б л и ц а 3. Зависимость пластической вязкости  $\eta_{пл}$  (кПа·с) макаронного теста из муки I сорта от скорости сдвига  $\dot{\gamma}$  (с<sup>-1</sup>) и влажности теста при температуре 40 °С и давлении 4,9 МПа**

Влажность, кг влаги на 1 кг теста									
0,285		0,300		0,310		0,320		0,330	
$\dot{\gamma}$	$\eta_{пл}$	$\dot{\gamma}$	$\eta_{пл}$	$\dot{\gamma}$	$\eta_{пл}$	$\dot{\gamma}$	$\eta_{пл}$	$\dot{\gamma}$	$\eta_{пл}$
0,033	1210	0,02	1140	0,018	870	0,014	750	0,005	930
0,204	423	0,098	420	0,09	302	0,094	216	0,02	394
0,57	233	0,28	232	0,33	144	0,28	121	0,088	190
0,85	185	0,53	165	0,61	108	0,77	63	0,36	70
1,18	153	0,89	125	1,06	75	1,32	47	0,89	40
1,51	134	1,44	94	1,68	59	1,89	38	1,67	27
1,94	117	2,25	70	2,33	48	2,43	31	2,39	21

**Т а б л и ц а 4. Зависимость пластической вязкости  $\eta_{пл}$  (кПа·с) макаронного теста из муки различных сортов от скорости сдвига  $\dot{\gamma}$  (с<sup>-1</sup>)**

Высший сорт		I сорт		Полукрупка	
$\dot{\gamma}$	$\eta_{пл}$	$\dot{\gamma}$	$\eta_{пл}$	$\dot{\gamma}$	$\eta_{пл}$
0,039	5,20	0,02	1140	0,02	1820
0,21	162	0,098	420	0,12	654
0,38	113	0,28	232	0,43	292
0,85	79	0,53	165	0,84	205
1,77	51	0,89	125	1,36	161
2,66	43	1,44	94	–	–

Задаваясь реологическими характеристиками теста и размерами канала, можно определить расход (объемную производительность канала) и перепад давления на каждом участке (рис. 4). При этом следует иметь в виду, что объемный расход (объемная производительность)  $Q_i = Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_4 = \text{const}$ . Из графика видно, что давление формования будет равно сумме перепадов давлений  $\Delta P_i$  на отдельных участках:

$$\Delta P_{\phi} = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \Delta P_4 = \sum \Delta P_i. \quad (26)$$

При использовании данных табл. 2–4 необходимо иметь в виду, что в них приводятся значения пластической вязкости  $\eta_{пл}$ . Взаимосвязь пластической вязкости с динамической вязкостью по Бингаму можно определить из выражения

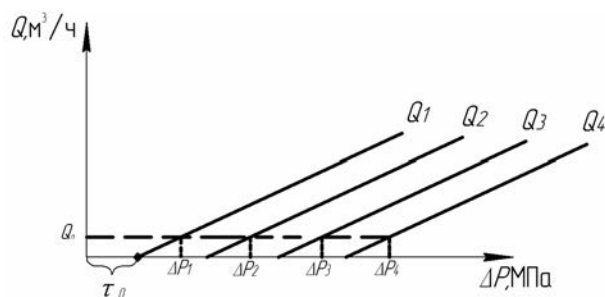


Рис. 4. График зависимости объемной производительности от перепада давления на каждом участке канала:  $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4$  – расход (объемная производительность канала) в каждой ступени канала;  $\tau_0$  – сдвиговая прочность материала;  $\Delta P_1, \Delta P_2, \Delta P_3, \Delta P_4$  – перепад давления в каждой ступени канала

$$\eta_{пл} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \tag{27}$$

Поскольку для бингамовских сред величина касательных напряжений  $\tau$  определяется по выражению (12), то значение пластической вязкости следующее:

$$\eta_{пл} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + \mu \tag{28}$$

Выражение (28) объясняет уменьшение пластической вязкости в табл. 2–4 с увеличением скорости сдвига.

Таким образом, полученные зависимости составляют теоретическую основу приближенных (оценочных) расчетов производительности макаронного пресса, давления формования как функции от конструктивных размеров формирующего канала и структурно-механических (реологических) характеристик тестовой массы. Для более строгих расчетов необходимо проанализировать погрешность от применения формулы Бингама при учете фактической зависимости вязкости тестовой массы от скорости сдвига, а также вклада входных реологических эффектов.

**Оптимизация конструкции матрицы. Новые технические решения.** Существенным недостатком прессования на шнековых макаронных прессах является неравномерность выпрессовывания макаронных изделий по плоскости матрицы. Неравномерная скорость прессования приводит к увеличению количества отходов и в конечном счете – к снижению производительности пресса. Количество отходов по указанной причине на макаронных прессах достигает до 20%.

На рис. 5 представлена эпюра скоростей и давления прессования макаронных изделий через круглую матрицу, из которой выделяется несколько кольцевых зон по ее диску с примерно одинаковой скоростью. В точках, расположенных по наружному радиусу значения, скорости прессования выше, чем в точках, расположенных ближе к центру матрицы. Наибольшая скорость истечения теста наблюдается в центральной части матрицы.

Исследования показали, что эпюра скоростей выпрессовываемых полуфабрикатов является прямым отражением характера распределения давления по полю матрицы. Выявлено, что температура в центральной части матрицы примерно одинаковая, а ближе к периферии начинает возрастать и достигает максимального значения в зоне предматричной камеры. Повышение температуры в периферийных слоях тестовой массы приводит к уменьшению вязкости формируемой массы и, как следствие, к увеличению значения скорости выпрессовывания в периферийных зонах матрицы. Высокая

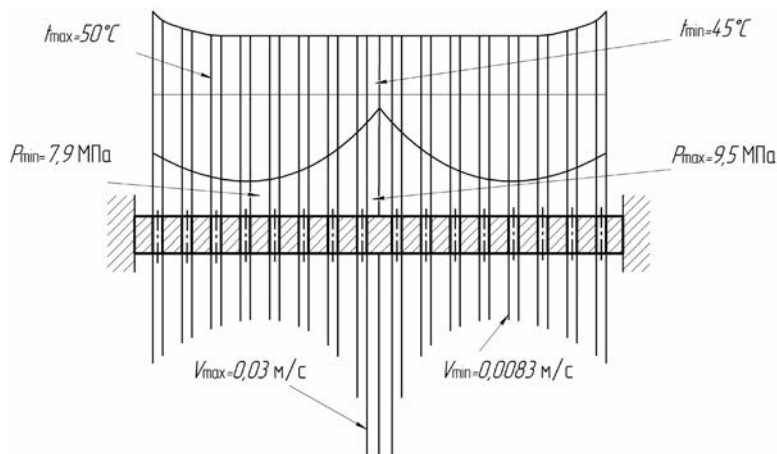


Рис. 5. Эпюра скоростей и давления прессования макаронных изделий через круглую матрицу



скорость формования изделий в центральной зоне матрицы объясняется максимальным давлением тестового потока.

В настоящее время неравномерность скоростей формования макаронных изделий по сечению матрицы остается не решенной проблемой как в отечественной, так и в зарубежной практике. Известно несколько способов частичного устранения неравномерности скоростей формования по зонам матрицы: применение устройств конусно-цилиндрической формы, колосников, тормозящих решеток, устанавливаемых на диск матрицы.

Наибольший эффект в данном направлении получен с помощью матрицы с различной высотой формирующих отверстий конструкции по патенту на изобретение РБ № 12618 (рис. 6). Конструкция матрицы основана на зависимости скоростей истечения тестовой массы от сопротивления формирующих отверстий. Известно, что с изменением высоты формирующего отверстия в диске матрицы изменяется и противодействие. Чем больше высота формирующего отверстия, тем выше сопротивление для прохода теста и соответственно меньше скорости его истечения.

Матрица для производства макаронных изделий представляет собой диск, в котором выполнены формирующие отверстия, имеющие одинаковый диаметр и различную высоту формирующей щели, а площадь диска разделена на кольцевые центральную, среднюю и периферийную зоны. При этом в центральной зоне высота формирующей щели наибольшая, а количество отверстий наименьшее, а в средней зоне высота формирующей щели наименьшая, а количество отверстий наибольшее. Здесь высота формирующей щели в средней зоне  $h_{cp}$  выбрана из первых чисел ряда Фибоначчи по числу 3, а количество отверстий в средней зоне  $Z_{cp}$  выбрано из последующих чисел того же ряда по числу 377.

Высота формирующей щели отверстий в периферийной зоне  $h_{п}$  определяется по формуле

$$h_{п} = (1,618)h_{cp}, \quad (29)$$

где  $h_{п}$  – высота формирующей щели отверстий в периферийной зоне;  $h_{cp}$  – высота формирующей щели отверстий в средней зоне; 1,618 – коэффициент пропорциональности. Высота формирующей щели отверстий в центральной зоне  $h_{ц}$  вычисляется по уравнению

$$h_{ц} = (2,618)h_{cp}, \quad (30)$$

(2,618 – коэффициент пропорциональности).

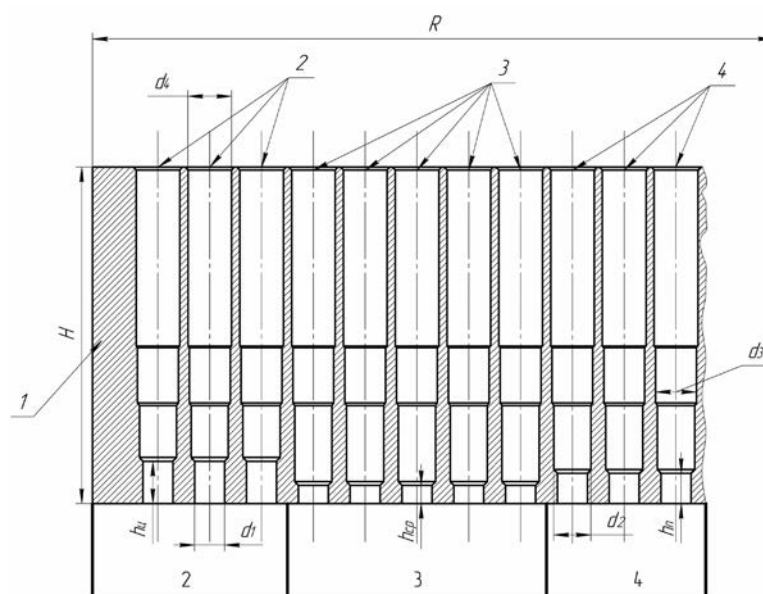


Рис. 6. Схема матрицы с различной высотой формирующих отверстий: 1 – корпус матрицы; 2, 3, 4 – формирующие отверстия матрицы периферийной зоны 2, средней зоны 3, центральной зоны 4

При этом количество отверстий в периферийной зоне  $Z_{\text{п}}$  определяется таким образом:

$$Z_{\text{п}} = \left[ \frac{Z_{\text{ср}}}{1,618} \right], \quad (31)$$

где квадратные скобки обозначают целую часть числа;  $Z_{\text{п}}$  – количество отверстий в периферийной зоне;  $Z_{\text{ср}}$  – количество отверстий в средней зоне. Количество отверстий в центральной зоне  $Z_{\text{ц}}$  вычисляется по выражению

$$Z_{\text{ц}} = \left[ \frac{Z_{\text{ср}}}{2,618} \right]. \quad (32)$$

Матрица содержит корпус 1, площадь которого разделена на кольцевые центральную 4, среднюю 3 и периферийную 2 зоны. При этом в центральной зоне высота  $h_{\text{ц}}$  формирующей щели отверстий наибольшая, а количество отверстий 4 наименьшее, а в средней зоне высота  $h_{\text{ср}}$  формирующей щели отверстий наименьшая, а количество отверстий 3 наибольшее.

Уплотненное макаронное тесто с помощью шнека, преодолевая сопротивление матрицы, продавливается сквозь формирующие отверстия 2, 3, 4 корпуса матрицы 1 посредством запрессовки.

Происходит формование теста, т.е. получение сырых макаронных изделий заданной формы, которая определяется профилем формирующих отверстий.

Выполнение условий по формулам (29), (30)–(32) обеспечивает равномерное распределение гидравлического сопротивления в зонах, что дестабилизирует движение теста через перфорированную поверхность, его сжатие, нарушает равномерное распределение его массы на единицу площади рабочей поверхности условной зоны и, как следствие, уменьшает производительность матрицы и ухудшает качество формования, а следовательно, и снижает эффективность работы устройства.

**Закключение.** Результаты выполненных исследований позволили разработать методику определения минимального давления формования, необходимого для преодоления предела текучести при сдвиге (предельного сопротивления сдвигу) макаронной тестовой массы, находящейся в каналах кругового, кольцевого, прямоугольного и произвольного сечений. Выполнена расчетная оценка этого давления при формовании теста первого и высшего сорта, а также теста на основе полукрупки для промышленно используемых типоразмеров каналов ступенчато-переменного сечения. Показано, что в общем гидродинамическом сопротивлении преобладает вклад составляющей, обусловленной вязким сдвиговым деформированием при течении. Произведена приближенная расчетная оценка скоростных и силовых параметров течения макаронного теста с использованием линейной вязкопластичной модели Бингама. Результаты исследований могут быть востребованы при проектировании формирующей оснастки, а также при разработке методов расчета процессов формования макаронного теста.

#### Список использованных источников

1. Шенкель, Г. Шнековые прессы для пластмасс: пер. с нем. / Г. Шенкель ; под ред. А. Я. Шапиро. – Л. : Госхимиздат, 1962. – 467 с.
2. Elbirii, B. Mathematical modeling of melting of polymers in barrier-screw extruders / B. Elbirii, J. T. Lindt // Polim. Eng. Sci. – 1983. – Vol. 23. – N 2. – P. 86–94.
3. Martin, J. Extruderzonen in denen Warmedurchleitung und erzwungene Konvektion abgefuehrt wird / J. Martin // Wärmeübertrag. – Kunststoffanfert. – Düsseldorf, 1986. – S. 169–196.
4. Potente, H. Durchsatzgleichung für Konventionelle, Plastifizier- extruder / H. Potente, H. Lappe // Kunststoffe. – 1984. – Bd 34, N 3. – S 173–177.
5. Melcion, I.P. La cuisson-extrusion dans le domaine alimentaire: principe, applications, perspectives / I.P. Melcion, P. Colonna // Revue de l'alimentation animale. – 1983. – N 368. – S. 45–51, 53–54.
6. Rossen, I. L. Food extrusion / I. L. Rossen, R. C. Miller // Food technology. – 1973. – N 27. – P. 46–53.
7. Структурно-механические характеристики пищевых продуктов / А. В. Горбатов [и др.]; под ред. А. В. Горбатова. – М. : Легкая и пищевая промышленность, 1982. – 296 с.
8. Мачихин, Ю. А. Инженерная реология пищевых материалов / Ю. А. Мачихин, С. А. Мачихин. – М. : Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 216 с.
9. Назаров, Н. И. Структурно-механические свойства макаронного теста / Н. И. Назаров, М. А. Калинина, Ю. В. Калинин // Хлебопекарная и кондитерская промышленность, 1971. – № 2 – С. 18–20.

10. Медведев, Г. М. Технология макаронного производства: учебник для вузов / Г. М. Медведев. – М. : Колос, 1998. – 272 с.

11. Груданов, В. Я. Процесс формирования макаронных изделий в узлах прессования с улучшенными гидравлическими и технологическими характеристиками / В. Я. Груданов, А. Б. Торган, В. М. Поздняков // Весці. НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2013. – № 2. – С. 58–65.

12. Назаров, Н. И. Технология макаронного производства / Н. И. Назаров. – М. : Легкая и пищевая промышленность, 1969. – 288 с.

## References

1. Shenkel, G. (1962), *Shnekovye pressy dlya plastmass* [Screw presses for plastics lane. with it], in Shapiro, A. Ya. (ed.), Goskhimizdat, Leningrad, RU.

2. Elbirii, B. and Lindt, J. T. (1983), "Mathematical modeling of melting of polymers in barrier-screw extruders", *Polymer Engineering and Science*, vol. 23, no. 2, pp. 86–94.

3. Martin, J. (1986), "Extruderzonen in denen Warmedurch Leitung und erzwungene Konvektion abgefuehrt wird", *Warmeuebertrag*, Kunststoffanfberreit, Dusseldorf, DE, no. 2, pp. 169–196.

4. Potente, H. and Lappe, H. (1984), "Potente Durchsatzgleichung fur Konventionele, Plastifizier- extruder", *Kunststoffe*, bd. 34, no. 3, pp. 173–177.

5. Melcion, I.P. and Colonna, P. (1983), "La cnisson-extrusion dans le domaine alimetaire: principe, applications, perspectives", *Revue de l'alimentation animal*, no. 368, pp. 45–51, 53–54.

6. Rossen, I. L. and Miller, R.C. (1973), "Food extrusion", *Food technology*, no. 27, pp. 46–53.

7. Gorbatov, A. V., Machikhin, S. A., Maslov, A. M., Tabachnikov, V. P., Machikhin, Yu. A. and Kosoi, V. D. (1982), *Strukturno-mekhanicheskie kharakteristiki pishchevykh produktov* [Structural and mechanical characteristics of the food], in Gorbatov A. V. (ed.), Light and Food Industry, Moscow, RU.

8. Machihin, Y. (1981), *Inzhenernaya reologiya pishchevykh materialov* [Engineering rheology of food materials], Light and food industrial st, Moscow, RU.

9. Nazarov, N. I., Kalinin, M. A. and Kalinin, Y. (1971), "Structurally-mechanical properties of the pasta", *Bakery and confectionery industry*, vol. 2, pp. 18–20.

10. Medvedev, G. M. (1998), *Tekhnologiya makaronnogo proizvodstva* [The technology of production of pasta]: a textbook for high schools, Kolos, Moscow, RU.

11. Grudanov, V. Y., Torhan, A. B. and Pozdnyakov, V. M. (2013), "The process of forming pasta pressing units with improved processability and hydraulic", *Vestsi NAN Belarusi. Ser. fiz.-tekhn. navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physico-technical series], vol. 2, pp. 58–65.

12. Nazarov, N. I. (1969), *Tekhnologiya makaronnogo proizvodstva* [Technology macaroni production], Light and Food Industry, Moscow, RU.

## Информация об авторах

*Груданов Владимир Яковлевич* – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологий и технического обеспечения процессов переработки сельскохозяйственной продукции. Белорусский государственный аграрный технический университет (220124, г. Минск, пр-т Независимости, 99, Беларусь).

*Торган Анна Борисовна* – кандидат технических наук, доцент кафедры технологий и технического обеспечения процессов переработки сельскохозяйственной продукции. Белорусский государственный аграрный технический университет (220124, г. Минск, пр-т Независимости, 99, Беларусь). E-mail: anechkat@tut.by

*Ткачева Людмила Тимофеевна* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры охраны труда. Белорусский государственный аграрный технический университет (220124, г. Минск, пр-т Независимости, 99, Беларусь).

## Для цитирования

Груданов, В. Я. Моделирование и оптимизация процессов формирования макаронных изделий в каналах матриц ступенчато-переменного сечения / В. Я. Груданов, А. Б. Торган, Л. Т. Ткачева // Вес. Нац. акад. Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2016. № 4. С. 73–83.

## Information about the authors

*Grudanov Vladimir Yakovlevich* – D. Sc. (Engineering), Professor, Professor of Technology and Logistics Processes, Processing of Agricultural Products. Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosti Ave., 220124, Minsk, Belarus).

*Torhan Anna Borisovna* – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor of Technology and Logistics Processes, Processing of Agricultural Products. Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosti Ave., 220124, Minsk, Belarus). E-mail: anechkat@tut.by

*Tkacheva Lyudmila Timofeevna* – Ph. D., (Engineering), Assistant Professor, Assistant Professor of Department of Health and Safety. Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosti Ave., 220124, Minsk, Belarus).

## For citation

Grudanov V. Ya., Torhan A. B., Tkachyova L. T. Modeling and optimization of processes of shaping of pastas in channels of matrices of step-variable section. Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, physical-technical series. 2016, no. 4, pp. 73–83.

**ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН**  
**POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER**

УДК 549.742.121+662.765

Поступила в редакцию 20.05.2016

Received 20.05.2016

**М. В. Малько, А. Н. Асадчий, С. В. Василевич, Д. В. Дегтеров**

*Институт энергетики НАН Беларуси, Минск, Беларусь*

**ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ  
ПИРОЛИЗНОЙ СМОЛЫ**

Обсуждаются результаты экспериментального исследования термического разложения смолы, образовавшейся в процессе пиролиза древесных опилок. Опыты по разложению смолы выполнены в изотермических условиях на лабораторной установке при 500, 600, 700 и 850 °С. Определены скорость гомогенного процесса термического разложения смолы и предельные степени разложения. Энергия активации гомогенного процесса по данным настоящей работы составила 63,1 кДж/моль. Установлено, что скорость термического разложения смолы повышается в случае внесения в реакционную зону образцов природных доломитов Беларуси. Это обусловлено протеканием гетерогенной каталитической реакции разложения смолы. Кажущаяся энергия активации данного процесса составила 57,2 кДж/моль, что согласуется с оценками других исследователей. Сделан вывод о перспективности природных доломитов Беларуси в качестве катализаторов термического разложения тяжелых углеводородов, образующихся в процессах термохимической конверсии биомассы.

*Ключевые слова:* пиролизная смола, доломит, кинетика разложения, энергия активации, предэкспоненциальный фактор.

**M. V. Malko, A. N. Asadchy, S. V. Vasilevich, D. V. Degterov**

*The Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

**STUDY OF THE KINETICS OF PYROLYTIC TAR THERMAL DECOMPOSITION**

The results of an experimental study of the thermal decomposition of tar formed in sawdust pyrolysis are discussed. The study was performed under static isothermal conditions at temperatures 500, 600, 700 and 850°C using a laboratory reactor.

The reactor is equipped with an electrical heater, which allows heating of the studied tar samples up to 1273 °C. The reactor consists of a reaction chamber made as a stainless steel cylinder with a diameter of 2 cm and a height of 10 cm.

The temperature in the reaction chamber was recorded using a thermocouple and a temperature meter-controller «Pine-002», providing the measurement of temperatures up to 1273 °C with the accuracy of  $\pm 0,01$  °C.

Samples of the tar produced at the pyrolysis of sawdust at 450 °C were installed into a quartz vessel and kept in the reaction chamber until they reached constant weight. This required about 60 minutes at 500 °C and about 5 minutes at 850°C and is a result of a homogeneous decomposition of tar. The initial weight of tar samples was about 1.5 gram. The change in their weights was determined at regular time intervals using the Stoll electronic balance with a relative error of 2%.

On the basis of the performed studies it was found that the apparent activation energy of a homogeneous decomposition of tar is equal to approximately 63.1 kJ/mol.

It was found as well that the rate of tar decomposition increased when samples of natural Belarusian dolomites were placed into the reaction zone. This increase is due to the occurrence of a heterogeneous catalytic reaction of tar decomposition. The apparent activation energy of this process was determined to be equal to 57.2 kJ/mol which is consistent with estimations of other researchers.

The conclusion about the prospects of natural dolomite Belarus as catalysts of thermal decomposition of heavy hydrocarbons generated during the thermochemical conversion of biomass has been drawn on the basis of the established results.

*Keywords:* pyrolytic tar, dolomite, decomposition kinetics, activation energy, pre-exponential factor

**Введение.** Газификация биомассы рассматривается специалистами многих стран мира в качестве перспективной технологии, позволяющей производить топливо для газовых турбин и когенерационных установок [1]. Фундаментальной проблемой практического применения газифи-

кации биомассы является образование пиролизных смол (тяжелых углеводов), которые имеют высокую точку росы и способны откладываться на различных элементах установок, что приводит к забиванию регулирующей арматуры, фильтров и т. п. [2–4]. Установлено, что полное разложение компонентов, входящих в состав смолы, возможно только при температуре горения порядка 1300 °С. Для обеспечения таких условий требуются значительные затраты энергии, существенно снизить которые позволяет применение катализаторов разложения углеводов [1].

В настоящее время в разных странах мира изучаются различные типы катализаторов термического разложения смолы, образующейся в процессах термохимической конверсии биомассы, на основе таких металлов, как Fe, Ni, Ru, Rh, Pt, а также неметаллические катализаторы (природные доломиты  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ , оливин  $(\text{Mg, Fe})_2\text{SiO}_4$  и др.). В результате данных исследований установлена высокая активность катализаторов на основе Ni, Ru, Rh, Pt, а также природных доломитов [5, 6].

В случае никелевых катализаторов нерешенной проблемой является отложение на их поверхности коксоподобного вещества, приводящее к резкому снижению каталитической активности. Катализаторы на основе Ru, Rh, Pt менее подвержены этому воздействию, однако их высокая стоимость исключает использование на промышленных установках.

Доломиты также имеют существенный недостаток – низкие механические свойства, что приводит к сильной эрозии и к снижению каталитической активности.

Преодоление отмеченных недостатков катализаторов разложения смолы является основным направлением в разработке эффективного и экономически оправданного способа очистки газовой смеси, образующейся при термохимической конверсии биомассы.

Проблема очистки пиролизных газов от компонентов смолы актуальна и для Беларуси. Наша страна имеет большие запасы древесины [7] и природных доломитов [8], что дает возможность получения газового топлива для покрытия энергетических потребностей.

В настоящей работе обсуждаются предварительные результаты исследования термического разложения смолы, образовавшейся в процессе пиролиза древесных опилок. Опыты выполнены в условиях гомогенного протекания этого процесса при 500, 600, 700 и 850 °С, а также в присутствии образцов природного доломита.

**Методика экспериментального исследования.** Опыты по разложению смолы выполнены на лабораторной установке (рис. 1) с реактором 1, оснащенным электрическим нагревателем 2, позволяющим нагревать образцы отожженного доломита до 1000 °С. Камера реактора 3 выполнена в виде цилиндра из нержавеющей стали диаметром 2 см и высотой 10 см, в который помещалась емкость 4 из кварцевого стекла с пиролизными смолами и доломитом. Температура в реакционной камере регистрировалась с помощью термодатчика 5 и измерителя-регулятора температур «Сосна-002» 6, обеспечивающих возможность работы при измерении температур до 1100 °С с точностью до  $\pm 0,01$  °С.

В опытах образцы смол 7 и доломита 8 выдерживались при заданной постоянной температуре. Масса образцов измерялась через определенные промежутки времени на электронных весах Stohl с относительной погрешностью 2%.

Образец смолы, полученной путем пиролиза древесины при 450 °С, помещался в кварцевую емкость, расположенную в реакторе. Содержание влаги в смолах 83,75%, плотность 1029,5 кг/м<sup>3</sup>. В случае каталитического разложения смол в кварцевую емкость дополнительно помещался образец отожженного доломита массой около 1,5 г.

**Результаты исследования.** Степень протекания реакции определялась по снижению массы образца, выдерживаемого при постоянной температуре. Результаты исследования динамики изменения массы смол представлены в табл. 1, 2. Значения степеней разложения смол рассчитаны по формуле

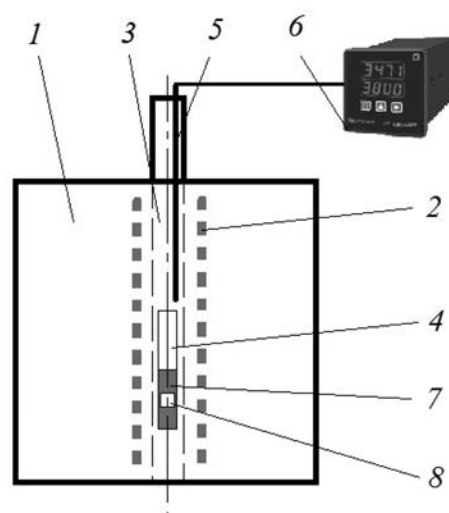


Рис. 1. Схема лабораторной установки: 1 – реактор; 2 – электрический нагреватель; 3 – камера реактора; 4 – кварцевая емкость; 5 – термодатчик; 6 – измеритель-регулятор температур «Сосна-002»; 7, 8 – образцы смолы и доломита соответственно

$$X = \frac{(m_0 - m_t)}{m_t}, \quad (1)$$

где  $m_0$  – исходная масса смолы, г;  $m_t$  – масса смолы в момент времени  $t$ , г.

Т а б л и ц а 1. Степени гомогенного разложения пиролизной смолы

$t$ , мин	500 °С	600 °С	700 °С	850 °С
0	0	0	0	0
1	–	–	0,207	0,546
2	–	0,344	0,419	0,763
5	0,126	0,508	0,652	0,842
10	0,231	0,672	0,690	0,842
20	0,336	0,713	0,690	0,842
30	0,371	0,754	0,729	0,842
60	0,388	0,754	0,729	0,842
90	0,388	0,754	0,729	0,842

Т а б л и ц а 2. Степени разложения пиролизной смолы в присутствии доломита

$t$ , мин	500 °С	600 °С	700 °С	850 °С
0	0	0	0	0
1	–	–	0,419	0,657
2	–	0,380	0,692	0,844
5	0,316	0,654	0,761	0,844
10	0,377	0,731	0,761	0,844
20	0,377	0,731	0,761	0,844
30	0,377	0,731	0,761	0,844
60	0,377	0,731	0,795	0,844
90	0,377	0,750	0,795	0,844

На рис. 2 представлены степени разложения смол, установленные в гомогенном процессе и в присутствии доломита. Как следует из данных табл. 1, 2 и рис. 2, скорость термического разложения смолы в случае присутствия доломита в зоне разложения оказалась выше, чем скорость

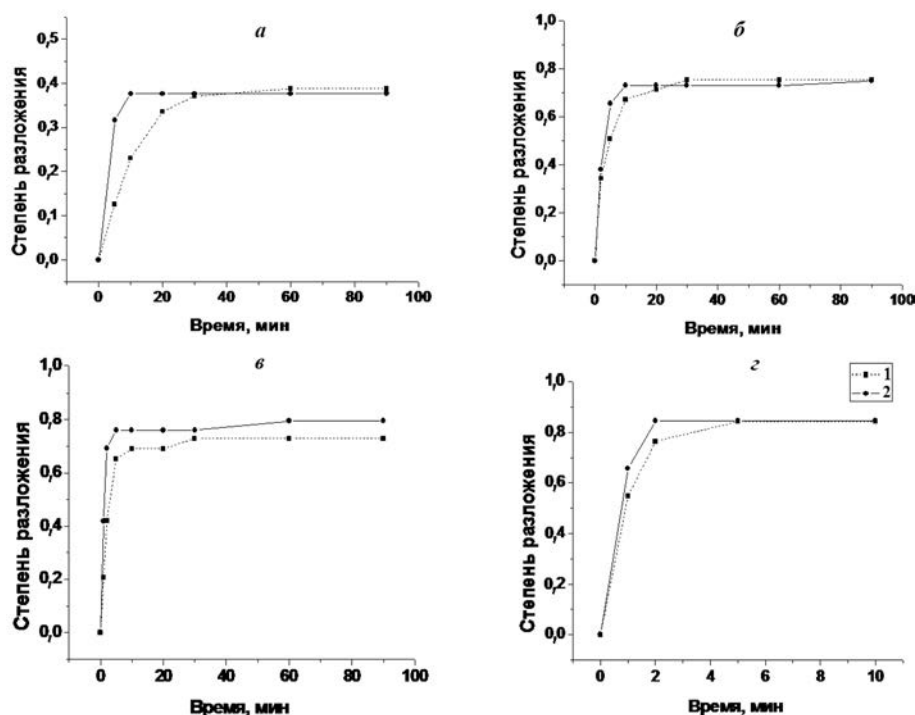


Рис. 2. Степени разложения смолы при температурах 500 °С (а), 600 °С (б), 700 °С (в), 850 °С (з): 1 – гомогенное разложение; 2 – разложение в присутствии доломита

гомогенного процесса. Это не может быть обусловлено протеканием каких-либо других процессов (например, сорбирования смол доломитом). Такое заключение следует из равенства предельных степеней разложения смол, установленное в настоящей работе для гомогенного процесса и процесса, протекающего в присутствии доломита (табл. 3).

Т а б л и ц а 3. **Предельные степени разложения смолы в гомогенном процессе и в случае присутствия доломита**

Условия эксперимента	T, °C			
	500	600	700	850
Гомогенное разложение	0,388	0,754	0,729	0,842
Присутствие доломита	0,377	0,750	0,795	0,844

Если бы наблюдаемое ускорение убыли смолы в присутствии доломита было бы обусловлено адсорбцией и абсорбцией компонентов смолы доломитом, то эта убыль снижалась бы с ростом температуры, так как значения адсорбции и сорбции веществ, как правило, уменьшаются с увеличением температуры.

В случае дополнительного снижения количества смолы в присутствии доломита только за счет адсорбции и абсорбции компонентов смолы следовало бы ожидать прироста массы образцов доломита с течением времени. Однако их взвешивание по окончании экспериментов показало, что величина конечной массы доломита совпадала полностью со значением начальной массы. Данное обстоятельство указывает на то, что наблюдаемое в опытах ускорение убыли массы смолы в присутствии образцов доломита обусловлено его каталитическим воздействием на данный процесс.

**Кинетика разложения смолы.** Анализ экспериментальных данных, обсуждаемых в настоящей работе, показал, что кинетика термического разложения смолы может быть описана с приемлемой точностью на основании уравнения, предложенного автором [9], для описания кинетики реакции карбонизации оксида кальция:

$$\frac{dX}{dt} = k \left( 1 - \frac{X}{X_u} \right)^n, \quad (2)$$

где  $X$  – степень превращения, определяемая выражением (1);  $k$  – константа скорости разложения смолы;  $X_u$  – предельная степень превращения;  $n$  – параметр, равный 1.

Интегрирование уравнения (2) при  $n=1$  дает следующее выражение:

$$X = X_u \left[ 1 - \exp \left( - \frac{kt}{X_u} \right) \right], \quad (3)$$

которое можно преобразовать относительно  $k$ :

$$k = \frac{X_u}{t} \ln \left[ 1 - \frac{X}{X_u} \right]. \quad (4)$$

Значения констант скорости гомогенного разложения смолы, констант скорости разложения смолы в присутствии доломита, а также констант скорости каталитического разложения смолы приведены в табл. 4. Значения констант скорости каталитического разложения смол, представленные в таблице, рассчитаны на основании соотношения

$$k_c = k_\Sigma - k_g. \quad (5)$$

Здесь  $k_c$  – константа скорости каталитического разложения смолы,  $k_\Sigma$  – константа скорости разложения смол в случае присутствия в реакционной зоне доломита,  $k_g$  – константа скорости гомогенного разложения смол. Соотношение (5) основано на представлении об одновременном протекании гомогенного и гетерогенного процессов разложения смолы. Аррениусовская зависимость константы скорости гомогенного разложения смолы ( $k_g$ ), значения которой представлены во второй строчке табл. 4, приведена на рис. 3.

Т а б л и ц а 4. Константы скорости разложения смолы (мин<sup>-1</sup>)

Условия эксперимента	T, °C			
	500	600	700	850
Гомогенное разложение	0,03611	0,1987	0,3932	0,8091
Присутствие доломита	0,06558	0,2965	0,6237	1,2727
Каталитическое разложение	0,02948	0,09781	0,2305	0,4636

Аппроксимация методом наименьших квадратов значений константы скорости термического разложения доломита (табл. 4) дает

$$\ln(k_g) = -7,58975 \frac{1000}{T} + 6,74717. \quad (6)$$

Точность аппроксимации определяется следующими величинами:

$$R^2 = 0,957, \quad p = 0,022. \quad (7)$$

Коэффициент, стоящий перед обратной температурой в выражении (6), определяет угол наклона зависимости (рис. 3). Умножение его величины на газовую постоянную  $R = 8,314$  Дж/(моль·К) и фактор 1000 определяет значение энергии активации  $E$  реакции, равное 63100 Дж/моль.

Свободный член зависимости (6) определяет значение предэкспоненциального фактора константы скорости, описывающего скорость термического разложения доломита в изученных условиях. Он равен  $8,52 \cdot 10^2$  мин<sup>-1</sup>.

Использование приведенных выше значений энергии активации и предэкспоненциального фактора приводит к следующим аррениусовским уравнениям, определяющим величины константы скорости разложения смолы в гомогенном процессе:

$$k_g = 8,52 \cdot 10^2 \exp\left(-\frac{63100}{RT}\right), \text{ мин}^{-1}. \quad (8)$$

Аррениусовская зависимость константы скорости каталитического разложения смолы ( $k_c$ ) показана на рис. 3, б.

Аппроксимация методом наименьших квадратов значений константы скорости термического разложения доломита (табл. 4) дает следующую зависимость:

$$\ln(k_c) = -6,88243 \frac{1000}{T} + 5,476. \quad (9)$$

Точность аппроксимации определяется таким образом:

$$R^2 = 0,989, \quad p = 0,0055. \quad (10)$$

Использование значений коэффициентов зависимости (9) позволяет вычислить значение энергии активации каталитического разложения смолы, равное 57200 Дж/моль (57,2 кДж/моль),

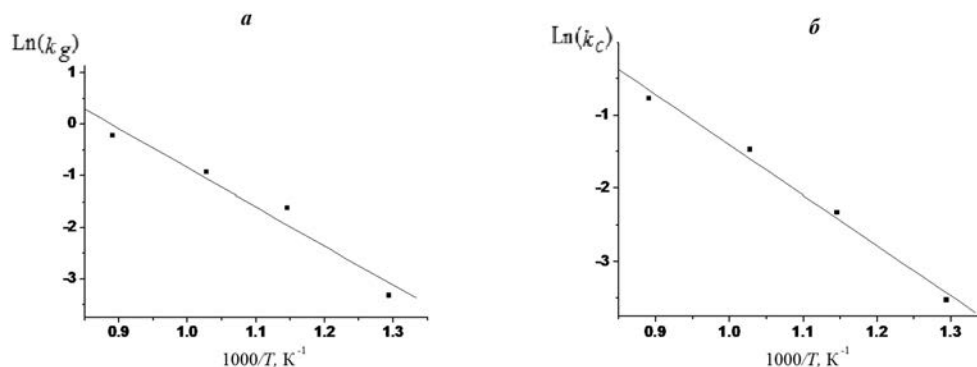


Рис. 3. Аррениусовская зависимость константы скорости гомогенного (а) и каталитического (б) разложения пиролизной смолы



которое согласуется с данными других исследователей. Так, согласно [10], величина энергии активации каталитического разложения смолы в присутствии различных гетерогенных катализаторов, соответствующая константе скорости первого порядка, составляет от 30 до 97 кДж/моль.

Использование коэффициентов аппроксимации (9) дает для расчета значений константы скорости каталитического разложения смолы в присутствии доломита следующую формулу:

$$k_c = 2,39 \cdot 10^2 \exp\left(-\frac{57200}{RT}\right), \text{ мин}^{-1}. \quad (11)$$

Сравнение выражений (8) и (11) показывает, что величина энергии активации каталитического разложения смолы примерно на 6 кДж/моль меньше, чем значение энергии активации гомогенного процесса, что указывает на каталитический эффект.

Как следует из приведенных выше результатов, внесение в реакционную зону образца доломита привело к росту скорости разложения смолы, образовавшейся в процессе пиролиза древесных опилок примерно в 2 раза по сравнению со скоростью гомогенного процесса. Столь малый прирост скорости разложения объясняется недостаточным количеством доломита в реакционной зоне. Как известно, скорость гетерогенного катализа зависит не только от активности катализатора, но также и от величины поверхности катализатора, доступной реагентам. Это позволяет повысить скорость гетерогенной каталитической реакции путем увеличения количества катализатора в реакционной зоне. В первом приближении можно считать, что активная поверхность катализатора прямо пропорциональна его массе. Поэтому можно ожидать, что применение засыпки частиц доломита таких размеров и такой массы, которые были использованы в опытах, описанных в настоящей работе, приведет к росту степени разложения смолы. Например, использование засыпки частиц с массой, превышающей в 100 раз массу частиц доломита, изученных в настоящей работе, приведет к повышению скорости каталитического разложения смолы примерно в 100 раз. Согласно данным табл. 1, при температуре 850 °С примерно две трети исходного количества смолы разложилось за время порядка 1 мин. Осуществление этого процесса в реакторе с засыпкой частиц доломита с общей массой, превышающей массу частиц, изученных в настоящей работе, примерно в 100 раз, привело бы к повышению скорости каталитического разложения смолы примерно в 100 раз и, следовательно, к снижению времени разложения смолы до 1 с. Проведенные исследования позволяют подтвердить перспективность природных доломитов Беларуси для создания системы очистки продуктов термохимической конверсии биомассы от смолы.

**Заключение.** Результаты экспериментального исследования, выполненного в изотермических условиях на лабораторной установке при температурах 500, 600, 700 и 850 °С, показали, что природные доломиты Беларуси повышают скорость термического разложения смолы, образовавшейся в процессе пиролиза древесной биомассы. Установлено, что данный эффект обусловлен каталитическим влиянием природных доломитов на реакции термического разложения смолы. Доступность и дешевизна природных доломитов в Беларуси позволяют использовать их для очистки продуктов пиролиза и газификации от образующихся тяжелых углеводородов.

#### Список использованных источников

1. Bridgwater, A.V. Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass / A. V. Bridgwater // Chem. Eng. J. – 2003. – Vol. 91. – P. 87–102.
2. Evans, R. J. Molecular Characterization of the Pyrolysis of Biomass. 1. Fundamentals / R. J. Evans, T. A. Milne // Energy & Fuels, – 1987. – Vol. 1 (2). – P. 123–138
3. Biomass Gasifier Tars: Their Nature, Formation and Conversion / T. A. Milne, N. Abatzoglou, R. J. Evans // NREL Technical Report (NREL/TP-570-25357), November 1998.
4. The formation of Polyaromatic Hydrocarbons and Dioxins During Pyrolysis: A Review of the Literature with Descriptions of Biomass Composition, Fast Pyrolysis Technologies and Thermochemical Reactions / M. Garcia-Perez. – Washington State University Edition, June 2008.
5. A Review of the Literature on Catalytic Biomass Tar Destruction. Milestone Completion Report / D. Dayton // NREL/TP-510-32815, (2002), 27 p.
6. Review of Catalysts for Tar Elimination in Biomass Gasification / Z.A. El-Rub, E.A. Bramer, G. Brem // Ind. Eng. Chem. Res. – 2004. – Vol. 43. – P. 6911–6919.

7. Лесные ресурсы как возобновляемый энергетический потенциал Беларуси / А. И. Ковалевич // *Материалы международного семинара экспертов* (Минск, 22–24 февраля 2011 г.). – Минск: Беларуская навука. 2011. – С. 101–114.
8. Полезные ископаемые Беларуси: К 75-летию БелНИГРИ / Редкол.: С. П. Гудак [и др.]. – Минск: Адукацыя і выхаванне, 2002. – С. 395–398.
9. Lee, D. K. An apparent kinetic model for the carbonation of calcium oxide by carbon dioxide / D. K. Lee // *Chem. Eng. J.* – 2004. – Vol. 100. – P. 71–77.
10. Commercial steam reforming catalysts to improve biomass gasification with steam-oxygen mixtures. Catalytic tar removal / M. P. Aznar [et al.] // *Ind. Eng. Chem. Res.* – 1998. – Vol. 37. – P. 2668–2680.

## References

1. Bridgwater, A.V. (2003), "Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass", *Chemical Engineering Journal*, vol. 91, pp. 87–102.
2. Evans, R.J. and Milne, T.A. (1987), "Molecular Characterization of the Pyrolysis of Biomass. 1. Fundamentals", *Energy and Fuels*, vol. 1 (2), pp.123–138.
3. Milne, T. A., Evans, R. J. and Abatzoglou, N. "Biomass Gasifier "Tars": Their Nature, Formation, and Conversion", Golden, Colorado, available at: <http://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc681431/>, (Accessed 4.10. 2016).
4. Garcia-Perez, M. (2008), "The formation of Polyaromatic Hydrocarbons and Dioxins During Pyrolysis: A Review of the Literature with Descriptions of Biomass Composition, Fast Pyrolysis Technologies and Thermochemical Reactions", Washington State University, available at: <http://www.pacificbiomass.org/documents/TheFormationOfPolyaromaticHydrocarbonsAndDioxinsDuringPyrolysis.pdf>, (Accessed 4.10. 2016).
5. Dayton, D. (2002), "A Review of the Literature on Catalytic Biomass Tar Destruction. Milestone Completion Report", available at: <http://www.nrel.gov/docs/fy03osti/32815.pdf>, (Accessed 4.10. 2016).
6. El-Rub, Z.A., Bramer, E.A. and Brem, G. (2004), "Review of Catalysts for Tar Elimination in Biomass Gasification", *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 43, pp. 6911–6919.
7. Kovalevich, A.I. (2011), "Forests as a renewable energy potential of Belarus", *Materialy mezhdunarodnogo seminarov ekspertov (Minsk, 22–24 fevralya 2011 g.)* [Proceedings of the International Seminar of Experts (Minsk, February 22–24, 2011)], *Belaruskaya navuka*, Minsk, BY, pp. 101–114.
8. Gudak, S.P., Sinichkina, A.M. and Khomich, P.Z. (ed.) (2002), *Poleznye iskopaemye Belarusi* [Minerals Belarus], *Adukatsyya i vykhavanne*, Minsk, BY.
9. Lee, D.K. (2004), "An apparent kinetic model for the carbonation of calcium oxide by carbon dioxide", *Chemical Engineering Journal*, vol. 100, pp. 71–77.
10. Aznar, M.P., Caballero, M.A., Gil, J., Martin, J.A. and Carella, J. (1997), "Commercial steam reforming catalysts to improve biomass gasification with steam-oxygen mixtures. Catalytic tar removal", *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 7, pp. 2668–2680.

## Информация об авторах

*Малько Михаил Владимирович* – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института энергетики НАН Беларуси (ул. Академическая, 15, корп. 2, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: [mikhailvm@bas-net.by](mailto:mikhailvm@bas-net.by)

*Асадчий Андрей Николаевич* – научный сотрудник Института энергетики НАН Беларуси (ул. Академическая, 15, корп. 2, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: [asadchyi@tut.by](mailto:asadchyi@tut.by)

*Василевич Сергей Владимирович* – кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией Института энергетики НАН Беларуси (ул. Академическая, 15, корп. 2, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: [svasilevich@yandex.ru](mailto:svasilevich@yandex.ru)

*Дегтерев Дмитрий Валентинович* – старший научный сотрудник Института энергетики НАН Беларуси (ул. Академическая, 15, корп. 2, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: [ddegterov@mail.ru](mailto:ddegterov@mail.ru)

## Для цитирования

Исследование кинетики термического разложения пиролизной смолы / М. В. Малько [и др.] // *Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук.* – 2016. – № 4. – С. 84–90.

## Information about the authors

*Malko Mikhail Vladimirovich* – Ph. D. (Physics and mathematics), Leading Researcher of the Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (15, Academicheskaya str., building 2, 220072, Minsk, Belarus). E-mail: [mikhailvm@bas-net.by](mailto:mikhailvm@bas-net.by)

*Asadchyi Andrei Nikolaevich* – researcher of the Institute of Power Engineering of the National academy of Sciences of Belarus (15, Academicheskaya str. building 2, 220072, Minsk, Belarus). E-mail: [asadchyi@tut.by](mailto:asadchyi@tut.by)

*Vasilevich Sjarhei Vladimirovich* – Ph. D. (Engineering) Assistant Professor, Head of laboratory of the Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (15, Academicheskaya str., building 2, 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [svasilevich@yandex.ru](mailto:svasilevich@yandex.ru)

*Degterov Dmitry Valentinovich* – Senior researcher of the Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (15, Academicheskaya str., building 2, 220072, Minsk, Belarus). E-mail: [ddegterov@mail.ru](mailto:ddegterov@mail.ru)

## For citation

Malko M. V., Asdchyi A. N., Vasilevich S. V., Degterov D. V. Study of the kinetics of pyrolytic tar thermal decomposition. Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, physical-technical series. 2016, no. 4. pp. 84–90.

**РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ**  
**RADIOELECTRONICS AND INSTRUMENT-MAKING**

УДК 621.396.96

Поступила в редакцию 15.09.2016

Received 15.09.2016

**А. С. Солонар, С. Н. Ярмолик, А. С. Храменков, А. А. Михалковский**

*Военная академия Республики Беларусь*

**ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО  
ДЛЯ АППРОКСИМАЦИИ СТАТИСТИЧЕСКИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ РЕЗУЛЬТАТОВ  
НЕЛИНЕЙНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ В РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ЗАДАЧАХ**

Рассмотрен подход к решению математических задач с использованием моделирования случайных величин (метод Монте-Карло). Наибольшую популярность данный метод приобрел для численного вычисления интегралов высокой кратности, поскольку относительно легко реализуется на современных ЭВМ. Проиллюстрирована возможность использования метода Монте-Карло для статистической аппроксимации распределений радиолокационных данных, при котором исходная плотность вероятности заменяется ее дискретным аналогом, формируемым на основе весов случайных отсчетов (частиц). При решении ряда задач, связанных с обработкой случайных реализаций наблюдаемых сигналов (радиолокационных, радионавигационных, связанных и т.п.), широко используются нелинейные преобразования. Отмеченные преобразования неизбежно приводят к трансформации законов распределения решаемой статистики, результаты которой весьма сложно описываются аналитическими методами. Рассмотрены основные особенности применения метода статистической аппроксимации типовых распределений, образующихся в результате нелинейных преобразований данных радиолокационного наблюдения. Показано, что в результате некоторых нелинейных преобразований наблюдаются погрешности аппроксимации закона распределения, обусловленные эффектом «оскудения» выборки. Показано, что данный эффект преодолевается путем перегруппировки случайных частиц в окрестности наиболее значимых отсчетов. Приведенный материал позволяет расширить область применения численных методов, основанных на использовании моделирования случайных величин.

*Ключевые слова:* плотность вероятности, аппроксимация, метод Монте-Карло, нелинейные преобразования, радиолокационное наблюдение.

**A. S. Solonar, S. N. Yarmolik, A. S. Khramenkov, A. A. Mikhalkovski**

*Military Academy of the Republic of Belarus*

**FEATURES OF USE OF MONTE-CARLO METHOD FOR APPROXIMATION OF STATISTICAL  
DISTRIBUTIONS OF RESULTS OF NONLINEAR TRANSFORMATIONS IN RADAR-TRACKING PROBLEMS**

An approach to the decision of mathematical problems with use of modelling random variables, the method which has received the name of Monte-Carlo is considered. The given method has got the greatest popularity for numerical calculation of high frequency rate integrals because it is rather easily realised on modern computers.

Possibility of use Monte-Carlo method for statistical approximation of radar-tracking data distributions at which the initial density of probability is replaced with its discrete analogue, which formed on the basis of random samples (particles) weights is illustrated. Nonlinear transformations of observable data are widely used at the decision of some problems connected with processing of random realisations of observable signals (radar-tracking, radio navigating, coherent, etc.) Noted transformations inevitably lead to transformation of distribution laws of the solving statistics which results it is rather difficult described by analytical methods. In article the basic features of application statistical approximation method for typical distributions, formed as a result of nonlinear transformations of radar-tracking observation data are considered. It is shown, that at some nonlinear transformations errors of law the distributions approximations caused by effect «scanty» of sample are observed. It is shown, that the effect «scanty» samples is overcome by a resampling of random particles in a vicinity of the most significant samples. The resulted material allows to expand a scope of the numerical methods, based on use of modelling random variables.

*Keywords:* probability density, approximation, method of Monte-Carlo, nonlinear transformations, radar-tracking observation.

**Введение.** Методом Монте-Карло принято называть совокупность численных методов решения математических задач с использованием моделирования случайных величин и процессов [1]. Возникновение данного метода связывают с именами американских ученых, работавших в 40-х годах XX в. в Лос-Аламосе (США): Дж. Неймана, С. Улама, Н. Метрополиса, а также Г. Кана и Э. Ферми.

Основная идея метода Монте-Карло заключается в использовании взаимосвязи между вероятностными характеристиками случайных процессов и величинами, являющимися решениями задач математического анализа (значениями интегралов, решениями дифференциальных уравнений, вероятностными показателями качества и т.п.). Очевидно, что в ряде практически важных случаев вместо вычисления сложных аналитических выражений более предпочтительно определять эквивалентные значения соответствующих вероятностей или параметров статистических распределений [2]. В свою очередь повышение производительности вычислительных средств привело к возрастанию популярности численных методов.

Наибольшее распространение метод Монте-Карло получил для оценивания показателей качества функционирования сложных систем путем многократного повторения моделируемого процесса [3]. Выявление фундаментальных статистических закономерностей в нестандартных условиях аналитическими методами, как правило, является весьма сложной для исследователей задачей. В связи с этим в настоящее время все большее распространение получают методы компьютерного моделирования и анализа статистических закономерностей.

Вместе с этим метод Монте-Карло широко используется для приближенного вычисления интегралов от неслучайной функции [1, 2]. Наибольший интерес представляют численные методы вычисления интегралов высокой кратности, которые относительно легко реализуются на современных ЭВМ. В основе численного интегрирования методом Монте-Карло лежит моделирование случайных величин и использование следующего приближения:

$$I = \int_{R^{n_\alpha}} g(\alpha) d\alpha \cong I_N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{g(\alpha_i)}{q(\alpha_i)}, \quad (1)$$

где  $R^{n_\alpha}$  – область интегрирования неслучайной функции  $g(\alpha)$ ;  $n_\alpha$  – мерность вектора  $\alpha$ ;  $N$  – количество генерируемых независимых случайных значений  $\alpha_i$  ( $i$  – номер сгенерированного датчиком чисел случайного аргумента ( $i = 1, N, N \gg 1$ )), одинаково распределенных в области  $R^{n_\alpha}$  с некоторой плотностью распределения  $q(\alpha)$ .

Совокупность случайных отсчетов, распределенных в соответствии с плотностью  $q(\alpha)$ , называют значимой выборкой (Importance Sampling), а саму плотность вероятности  $q(\alpha)$  – значимой плотностью вероятности (Importance Density) [1].

Для независимых отсчетов  $\alpha_i$  оценка  $I_N$  является несмещенной и в соответствии с законом больших чисел сходящейся по вероятности к истинному значению  $I$ . Дисперсия ошибки оценки искомого интеграла определяется выражением [1]:

$$D_N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{g(\alpha_i)}{q(\alpha_i)} - I_N \right)^2. \quad (2)$$

Следует отметить, что выбор плотности вероятности  $q(\alpha)$  случайных отсчетов диктуется требованием минимизации дисперсии (2). На практике наиболее распространено правило выбора плотности  $q(\alpha)$ , предложенное Г. Каном [1]: функция  $q(\alpha)$  считается допустимой по отношению к функции  $g(\alpha)$ , если выполняется следующее условие:  $q(\alpha) > 0$  для всех  $\alpha \in R^{n_\alpha}$ , в которых  $|g(\alpha)| > 0$ .

Область разброса случайных значений плотности  $q(\alpha)$  должна покрывать область всех возможных значений интегрируемой функции  $g(\alpha)$ . При этом желательно выбирать плотность  $q(\alpha)$ , по возможности пропорциональную  $|g(\alpha)|$ . Минимальное значение (2) достигается при выполнении условия  $q(\alpha) = c|g(\alpha)|$  с точностью до постоянного множителя  $c$ .

Методы численного интегрирования в настоящее время широко используются в качестве альтернативы аналитическим методам. Кроме того, численные методы позволяют находить решение для тех задач, для которых оно аналитически невозможно.

Весьма востребованным направлением использования метода Монте-Карло является аппроксимация результатов нелинейных преобразований над случайными данными (наблюдениями). В ряде задач, связанных с обработкой случайных реализаций наблюдаемых сигналов (например, радиолокационных, радионавигационных, связанных и т. п.), широко используются нелинейные преобразования. Они неизбежно приводят к трансформации закона распределения решающей статистики, результаты которой сложно описываются аналитическими методами. При этом особенностью решаемой задачи является использование выборки случайных данных конечных размеров. Применение метода Монте-Карло в данном направлении является весьма перспективным. Вместе с этим прямое использование метода Монте-Карло часто приводит к значительным погрешностям аппроксимации. Однако в большинстве случаев имеется возможность решения задачи аппроксимации с требуемым качеством на основе метода Монте-Карло при учете специфики и особенностей генерируемых случайных отсчетов.

Следует отметить, что в отечественной и зарубежной литературе недостаточно освещены вопросы, касающиеся особенностей использования метода Монте-Карло для аппроксимации статистических распределений результатов нелинейных преобразований в радиолокационных задачах.

Цель данной статьи – рассмотрение особенностей использования метода Монте-Карло для аппроксимации статистических распределений результатов нелинейных преобразований в задачах радиолокационного наблюдения.

**Аппроксимация плотности вероятности методом Монте-Карло.** Задачи радиолокационного наблюдения сигналов имеют статистический характер и решаются соответствующими методами [4]. Ограниченность времени наблюдения сигналов, их флуктуации и наличие случайных шумов и помех определяют используемые критерии оптимальности и во многом специфику обработки полученных данных.

Наличие нелинейных преобразователей в тракте обработки радиолокационных сигналов существенно затрудняет процесс расчета показателей качества функционирования рассматриваемых систем. Основу данного процесса составляет интегрирование плотности распределения результатов нелинейной обработки реализаций принятого сигнала. В большинстве практически важных случаев аналитическое решение рассматриваемой задачи вызывает серьезные математические затруднения либо не представляется возможным. Кроме того, ограничение длительности выборки наблюдаемых данных обуславливают асимптотический характер получаемых результатов [4].

Необходимо отметить, что применение численного метода Монте-Карло позволяет перейти от непосредственного анализа сложных статистических распределений, являющихся результатом нелинейных преобразований распределений обрабатываемых данных, к анализу их статистических аппроксимаций.

В основу методики аппроксимации плотности вероятности методом Монте-Карло положен известный подход к приближенному представлению непрерывной функции последовательностью ее дискретных значений, рассовмещенных по области определения [5]. Полагая, что неслучайная функция  $g(\alpha)$  является плотностью вероятности дискретной случайной величины  $\alpha$ , рассматриваемый подход позволяет получить эквивалентную дискретную плотность вероятности, определенную в узловых точках распределения  $\alpha_i$  [6]:

$$g(\alpha) \approx \lim_{N \rightarrow \infty} \left( \sum_{i=1}^N \omega_i \delta(\alpha - \alpha_i) \right), \quad (4)$$

где  $\omega_i$  – нормированные веса.

Аналогичный результат можно получить на основании выражения (1). Вычислив методом Монте-Карло интеграл от плотности вероятности  $g(\alpha)$ , запишем

$$I_N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{g(\alpha_i)}{q(\alpha_i)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tilde{\omega}_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\tilde{\omega}_i}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tilde{\omega}_i} = \sum_{i=1}^N \frac{\tilde{\omega}_i}{\sum_{i=1}^N \tilde{\omega}_i} = \sum_{i=1}^N \omega_i \cong 1, \quad (5)$$

где  $\tilde{\omega}_i = g(\alpha_i)/q(\alpha_i)$  – ненормированные веса;  $\omega_i = \tilde{\omega}_i / \sum_{i=1}^N \tilde{\omega}_i$  – нормированные веса.

Исходя из свойств плотности вероятности, интеграл  $I_N$  по области определения  $R^{n^\alpha}$  плотности вероятности  $g(\alpha)$  равен 1 и представляет собой сумму нормированных весов  $\omega_i$  ( $i = \overline{1, N}$ ), определенных в случайных точках (отсчетах аргумента)  $\alpha_i$ . При этом соблюдается строгое однозначное соответствие пар  $\{\alpha_i, \omega_i\}$  для всех  $i = \overline{1, N}$ . В зарубежных источниках эти пары принято называть частицами (particle) [2, 6].

Однозначное соответствие пар  $\{\alpha_i, \omega_i\}$  и равенство единице суммы нормированных весов  $\omega_i$  позволяют утверждать, что для вычисления интеграла (1) методом Монте-Карло исходную плотность вероятности  $g(\alpha)$  заменяют эквивалентной дискретной плотностью вероятности, определенной в случайных точках  $\alpha_i$ . Представление плотности вероятности  $g(\alpha)$  ее дискретным аналогом принято называть *аппроксимацией плотности вероятности методом Монте-Карло* [6]:

$$g(\alpha) \approx \sum_{i=1}^N \omega_i \delta(\alpha - \alpha_i). \quad (6)$$

Полученная численным методом Монте-Карло аппроксимация плотности вероятности сохраняет все требуемые характеристики исходного распределения [1, 6]. Рассмотренный подход, основанный на возможности аппроксимации произвольной плотности вероятности набором  $N$  случайных точек, распределенных по объему интегрирования, позволяет относительно просто учитывать сложные нелинейные преобразования над исходным распределением, а также производить интегрирование полученных распределений.

Трансформация распределения, обусловленная нелинейным преобразованием  $p_h(\alpha) = h[g(\alpha)]$ , достаточно просто учитывается преобразованием каждой координаты  $h(\alpha_i)$  из  $\omega_i$  частиц с неизменным сохранением ее веса  $\omega_i$  ( $i = \overline{1, N}$ ). Таким образом, после нелинейного преобразования результирующая плотность вероятности  $p_h(\alpha)$  аппроксимируется  $N$  частицами  $\{h(\alpha_i), \omega_i\}$  ( $i = \overline{1, N}$ ):

$$p_h(\alpha) = h[g(\alpha)] \approx \sum_{i=1}^N \omega_i \delta(h[\alpha] - h[\alpha_i]). \quad (7)$$

Следует отметить, что специфика задач радиолокационного наблюдения предполагает некоторые особенности использования метода Монте-Карло для аппроксимации плотности распределения результатов нелинейных преобразований входных случайных данных.

Применительно к задачам радиолокационного наблюдения исходной плотностью вероятности обрабатываемых данных в силу центральной предельной теоремы часто является закон распределения Гаусса [4, 6]. В связи с этим целесообразно для метода Монте-Карло выбор значимой плотности и ее параметров проанализировать применительно к исходному распределению Гаусса:

$$g(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_\alpha} e^{-\frac{(\alpha - m_\alpha)^2}{2\sigma_\alpha^2}}, \quad (8)$$

где  $m_\alpha$  и  $\sigma_\alpha^2$  – параметры исходного распределения (математическое ожидание и дисперсия).

**Статистическая аппроксимация исходной плотности вероятностей.** На рис. 1 приведены исходный закон распределения наблюдаемых данных  $g(\alpha)$  ( $m_\alpha = 0$ ,  $\sigma_\alpha^2 = 1$ ) и результаты его статистической аппроксимации в форме гистограмм. В качестве значимых плотностей распределения  $q_1(\alpha)$  применялся равномерный закон ( $m_{q_1} = m_\alpha$ ,  $\sigma_{q_1}^2 = 4\sigma_\alpha^2$ ) (рис. 1, а) и закон распреде-

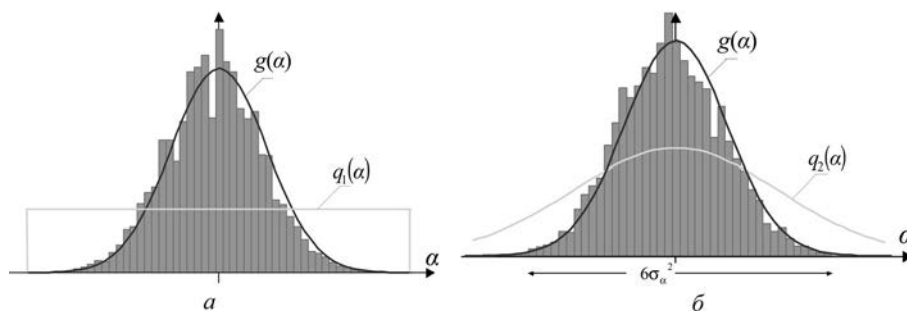


Рис. 1. Закон распределения Гаусса и его статистическая аппроксимация методом Монте-Карло:  $a$ ,  $b$  – значимая плотность вероятности в виде равномерного закона распределения и закона распределения Гаусса соответственно

ления Гаусса  $q_2(\alpha)$  ( $m_{q_2} = m_\alpha$ ,  $\sigma_{q_2}^2 = 2\sigma_\alpha^2$ ) (рис. 1,  $b$ ). Статистическая аппроксимация реализовывалась с использованием выражения (6). Качество аппроксимации оценивалось с помощью нормированной гистограммы весовых коэффициентов, отсчеты которой – значения суммарной вероятности попадания моделируемых весов в каждый из анализируемых интервалов гистограммы. При расчетах использовано  $N = 3000$  случайных отсчетов (число интервалов гистограммы 50).

Полученные результаты свидетельствуют о работоспособности метода Монте-Карло. Они подтверждают правила выбора  $q(\alpha)$  и демонстрируют более высокую точность аппроксимации в тех случаях, когда значимая плотность распределения ближе по форме к исходной плотности (рис. 1). Кроме того, проведенные исследования показали, что при имеющихся отличиях в форме распределений  $g(\alpha)$  и  $q(\alpha)$  дисперсия значимой плотности вероятности должна быть увеличена:  $\sigma_q^2 > \sigma_\alpha^2$ .

Аналогичные закономерности проявляются при аппроксимации многомерных распределений. Результаты статистической аппроксимации совместной плотности вероятности квадратурных составляющих комплексной огибающей отраженного радиолокационного сигнала  $p(x_M, y_M)$  [7] приведены на рис. 2,  $a$ . При этом каждая из анализируемых квадратурных составляющих ( $p(x_M)$  и  $p(y_M)$ ) характеризуется одномерным распределением Гаусса (рис. 2,  $b$ ).

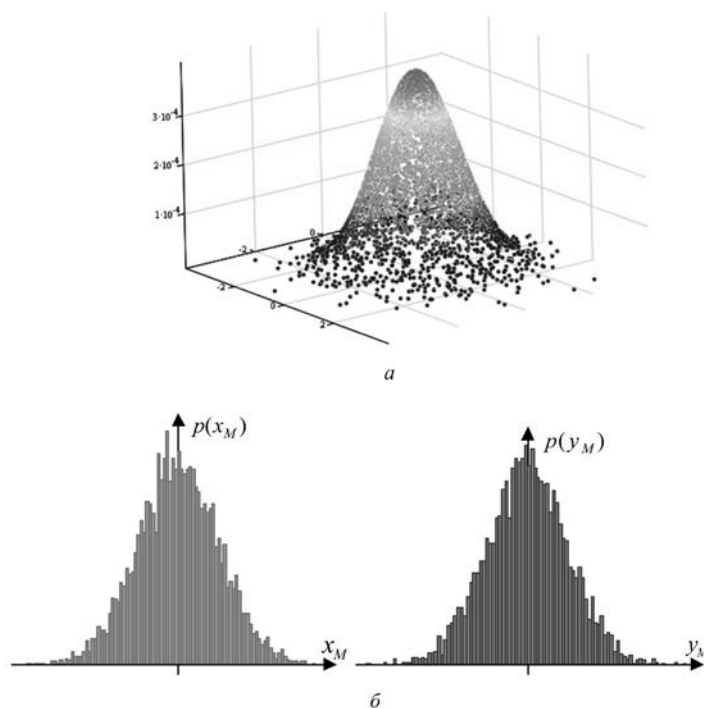


Рис. 2. Статистика отраженного сигнала и ее аппроксимации методом Монте-Карло:  $a$ ,  $b$  – соответственно совместное распределение и распределение квадратурных составляющих отраженного сигнала

Приведенные результаты (рис. 2, *а, б*) подтверждают эффективность использования метода Монте-Карло для статистической аппроксимации как одномерных, так и многомерных распределений. Очевидно, что правильный выбор параметров значимой плотности вероятности  $q(\alpha)$  позволит качественно решить задачу аппроксимации. Точность аппроксимации повышается при приближении формы значимой плотности распределения к исходному распределению. При этом необходимо обеспечить расположение большинства (более 90%) генерируемых случайных отсчетов  $\alpha_i$  в области высокой вероятности аппроксимируемой плотности  $g(\alpha)$  при одновременном размещении достаточного количества (более 10%) случайных отсчетов вне области высокой вероятности. В противном случае имеет место явление «оскудения» [6] случайной выборки, что приведет к возрастанию погрешности аппроксимации.

**Статистическая аппроксимация результата нелинейных преобразований исходной плотности вероятностей.** Проиллюстрируем использование метода Монте-Карло для статистической аппроксимации распределений, образующихся в результате типовых нелинейных преобразований исходной плотности вероятности радиолокационных данных. При анализе применялся подход, основанный на выражении (7): случайные точки (отсчеты)  $\alpha_i$  подвергались используемому нелинейному преобразованию  $h[\alpha_i]$ . Обеспечиваемое качество аппроксимации данных оценивалось посредством нормированной гистограммы весовых коэффициентов, отсчетами которой были значения суммарной вероятности попадания моделируемых весов в каждый из анализируемых интервалов гистограммы.

Ожидаемые законы распределения наблюдаемых радиолокационных данных  $p_h(\alpha) = h[g(\alpha)]$  приведены после типовых нелинейных преобразований: вычисление амплитуды (рис. 3, *а*), фазы (рис. 3, *б*) и мгновенной мощности (рис. 3, *в*) отраженного сигнала [7], а также результаты их статистической аппроксимации методом Монте-Карло в виде гистограмм. Графики (рис. 3, *а, б, в*) позволяют утверждать, что результаты статистической аппроксимации соответствуют ожидаемым распределениям амплитуды ( $p(E_c)$  – распределение Рэлея), фазы ( $p(\varphi_c)$  – равномерное распределение) и мгновенной мощности отраженного сигнала ( $p(P_c)$  – экспоненциальное распределение) согласно критерию  $\chi^2$  Пирсона с уровнем значимости 0,05.

Следует отметить, что в некоторых случаях нелинейные преобразования данных могут привести к тому, что результирующее распределение будет характеризоваться наличием ярко выраженных одной или нескольких мод. На рис. 4, *а* приведены распределение результата экспоненциального преобразования вида  $z = e^{xM}$  и его статистическая аппроксимация методом Монте-Карло.

Очевидно, что непосредственное использование метода Монте-Карло для аппроксимации нелинейного преобразования (рис. 4, *а*) приводит к существенным погрешностям. Погрешности аппроксимации обусловлены «большим» разбросом координат случайных частиц после нелинейного преобразования, по окончании которого часть из них попадает в область малой вероятности («оскудение» выборки). Таким образом, снижение числа частиц, вносящих основной вклад в результат аппроксимации нелинейного преобразования, может привести к существенному искажению  $p_h(\alpha)$ . В качестве меры вырождения принято использовать оценку эффективного размера выборки  $N_{eff}$ , которая показывает число частиц, находящихся в области высокой вероятности. В радиолокационных задачах имеет смысл предварительно найти область пространства  $\Delta V_\alpha^{(0,9)}$ , вероятность попадания в которую случайной величины после нелинейного

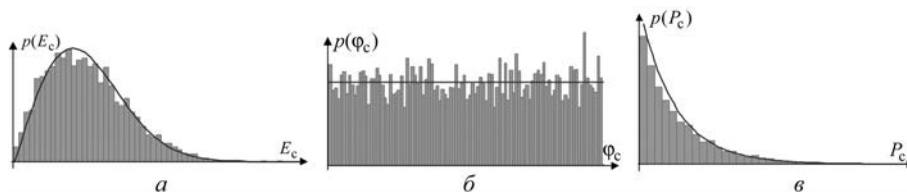


Рис. 3. Статистика отраженного сигнала и ее аппроксимации методом Монте-Карло: *а, б, в* – соответственно распределение амплитуды, фазы, мгновенной мощности



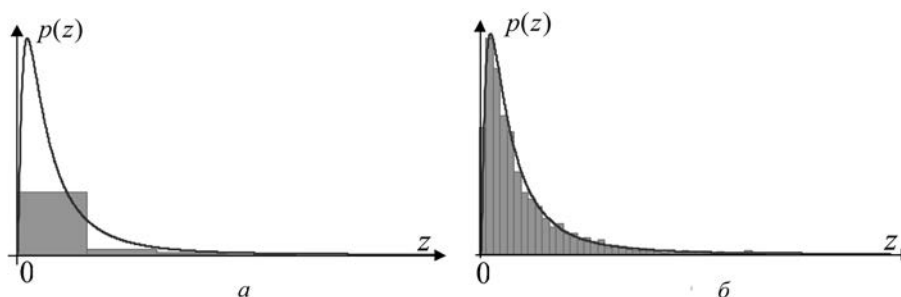


Рис. 4. Распределение данных после экспоненциального преобразования и его аппроксимации методом Монте-Карло:  $a$  – без использования перевыборки;  $b$  – с использованием перевыборки

преобразования равна 0,9:  $\int_{\Delta V_{\alpha}^{(0,9)}} p_h(\alpha) d\alpha = 0,9$ . Число  $N_{eff}$  определяется подсчетом частиц координаты, которые попали в область  $\Delta V_{\alpha}^{(0,9)}$ .

В 1994 г. А. Конг в качестве способа предотвращения эффекта «оскуднения» частиц предложил использовать перевыборку (Resampling) [6]. Этот способ заключается в группировке частиц выборки в окрестности наиболее значимых частиц, находящихся в области высокой вероятности, с последующим приданием им одинаковых весов. Алгоритм перевыборки подробно описан в [6, 8]. В результате перевыборки случайное множество частиц  $\{\alpha_i, \omega_i\}$  отображается в новое случайное множество  $\{\alpha_{newi}, 1/N\}$  с одинаковыми весами  $1/N$ .

Перевыборку имеет смысл проводить в тех случаях, когда после нелинейного преобразования наблюдается «оскуднение» выборки, т. е. когда значение  $N_{eff}$  становится ниже величины некоторого порога  $N_{thr}$ . В радиолокационных задачах имеет смысл выбирать  $N_{thr} = (0,9 - 0,98)N$ .

На рис. 4, б приведен результат статистической аппроксимации распределения данных методом Монте-Карло после экспоненциального преобразования с использованием процедуры перевыборки. Перераспределение случайных отсчетов привело к тому, что результат статистической аппроксимации соответствует ожидаемому распределению данных согласно критерию  $\chi^2$  Пирсона с уровнем значимости 0,05.

Приведенные результаты подтверждают возможность использования метода Монте-Карло в интересах аппроксимации статистических распределений наблюдаемых радиолокационных данных. При этом для качественной аппроксимации необходимо исключать явление вырождения случайных частиц.

**Заключение.** Первоначально метод Монте-Карло использовался, главным образом, для решения задач математической физики, где традиционные численные методы оказались малоприменимыми. Развитие средств вычислительной техники стимулировало проведение исследований, направленных на совершенствование подходов к использованию статистических методов. Достигнутые результаты позволили существенно расширить область применения метода Монте-Карло.

Приведены некоторые результаты компьютерного моделирования, иллюстрирующие возможность статистической аппроксимации распределений радиолокационных данных методом Монте-Карло. Рассмотрены основные особенности использования метода Монте-Карло для аппроксимации типовых плотностей распределения, образующихся в результате нелинейных преобразований данных при радиолокационном наблюдении. Проиллюстрированы аспекты выбора формы и параметров значимой плотности вероятности. Показано, что использование перевыборки как средства предотвращения «оскуднения» последовательности наблюдаемых отсчетов позволяет обеспечивать приемлемое качество статистической аппроксимации распределений наблюдаемых данных.

Знание особенностей применения методов Монте-Карло позволяет в настоящее время эффективно решать ряд практически важных задач в радиолокации, радионавигации, теории игр, теории массового обслуживания, математической экономики, а также задач теории передачи сообщений в различных условиях помеховой обстановки.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Соболев, И. М. Численные методы Монте-Карло / И. М. Соболев. – М.: Наука, 1973. – 312 с.
2. Тараскин, А. Ф. Статистическое моделирование и метод Монте-Карло: учебное пособие / А. Ф. Тараскин. – Самара: СГАУ, 1997. – 62 с.
3. Быков, В. В. Цифровое моделирование в статистической радиотехнике / В. В. Быков. – М.: Советское радио, 1971. – 328 с.
4. Репин, В. Г. Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем / В. Г. Репин, Г. П. Тартаковский. – М.: Советское радио, 1977. – 432 с.
5. Вадзинский, Р. Н. Справочник по вероятностным распределениям / Р. Н. Вадзинский. – СПб.: Наука, 2001. – 295 с.
6. Ristic, B. Beyond the Kalman Filter. Particle filters for tracking applications / B. Ristic, S. Arulampalam, N. Gordon. – London: ArtechHouse, 2004. – 300 p.
7. Охрименко, А. Е. Основы радиолокации и РЭБ / А. Е. Охрименко. – М.: Воениздат, 1983. – 456 с.
8. Горшков, С. А. Обобщенный метод Монте-Карло в нелинейной дискретной фильтрации байесовско-марковских параметров / С. А. Горшков, А. С. Солонар, А. В. Парахневич // Вестник связи. – 2012. – № 4. – С. 31–36.

### References

1. Sobol', I. M. (1973), *Chislennyye metody Monte-Karlo* [Numerical methods of Monte-Carlo], Nauka, Moscow, RU.
2. Taraskin, A. F. (1997), *Statisticheskoe modelirovanie i metod Monte-Karlo: uchebnoe posobie* [Statistical modelling and method of Monte-Carlo: the manual], SGAU, Samara, RU.
3. Bykov, V. V. (1971), *Tsifrovoe modelirovanie v statisticheskoi radiotekhnike* [Digital modelling in statistical radio engineering], Sovetskoe radio, Moscow, RU.
4. Repin, V. G. and Tartakovskii, G. P. (1977), *Statisticheskii sintez pri apriornoi neopredelennosti i adaptatsiya informatsionnykh sistem* [Statistical synthesis at aprioristic uncertainty and adaptation of information systems], Sovetskoe radio, Moscow, RU.
5. Vadzinskii, R. N. (2001), *Spravochnik po veroyatnostnym raspredeleniyam* [The directory about likelihood distributions], Nauka, St. Petersburg, RU.
6. Ristic, B., Arulampalam, S. and Gordon, N. (2004), *Beyond the Kalman Filter. Particle filters for tracking applications*, ArtechHouse, London, UK.
7. Okhrimenko, A. E. (1983), *Osnovy radiolokatsii i REB* [Bases of a radar-location and RES], Voenizdat, Moscow, RU.
8. Gorshkov, S. A., Solonar, A. S. and Parakhnevich, A. V. (2012), "The generalized method of Monte-Carlo in a nonlinear discrete filtration Bayesian-Markovian parameters", *Vestnik svyazi* [The Communication bulletin], no. 4, pp. 31–36.

### Информация об авторах

*Солонар Андрей Сергеевич* – кандидат технических наук, доцент, докторант кафедры радиолокации и приема-передающих устройств. Военная академия Республики Беларусь (220057, г. Минск, пр-т Независимости, 220, Беларусь). E-mail: Andssnew@yandex.ru

*Ярмолик Сергей Николаевич* – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры радиолокации и приема-передающих устройств. Военная академия Республики Беларусь (220057, г. Минск, пр-т Независимости, 220, Беларусь). E-mail: Yarmsergei@yandex.ru

*Храменков Андрей Сергеевич* – старший инженер кафедры радиолокации и приема-передающих устройств. Военная академия Республики Беларусь (220057, г. Минск, пр-т Независимости, 220, Беларусь). E-mail: Xras.tech@mail.ru

*Михалковский Артем Александрович* – инженер кафедры радиолокации и приема-передающих устройств. Военная академия Республики Беларусь (220057, г. Минск, пр-т Независимости, 220, Беларусь). E-mail: Mikh.tech@mail.ru

### Для цитирования

Солонар, А. С. Особенности использования метода Монте-Карло для аппроксимации статистических распределений результатов нелинейных преобразований в радиолокационных задачах / А. С. Солонар, С. Н. Ярмолик, А. С. Храменков, А. А. Михалковский // Весті. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2016. – № 4. – С. 91–98.

### Information about the authors

*Solonar Andrey Sergeevich* – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor, Postdoctoral Student, the Department of Radar-location and Send-Receive Devices. Military Academy of the Republic of Belarus (220, Nezavisimosti Ave., 220057, Minsk, Belarus). E-mail: Andssnew@yandex.ru

*Yarmolik Sergey Nikolaevich* – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor, Professor, the Department of Radar-location and Send-Receive Devices. Military Academy of the Republic of Belarus (220, Nezavisimosti Ave., 220057, Minsk, Belarus). E-mail: Yarmsergei@yandex.ru

*Khramenkov Andrey Sergeevich* – senior engineer, the Department of Radar-location and Send-Receive Devices. Military Academy of the Republic of Belarus (220, Nezavisimosti Ave., 220057, Minsk, Belarus). E-mail: Xras.tech@mail.ru

*Mikhalkovski Artem Aleksandrovich* – engineer, the Department of Radar-location and Send-Receive Devices. Military Academy of the Republic of Belarus (220, Nezavisimosti Ave., 220057, Minsk, Belarus). E-mail: Mikh.tech@mail.ru

### For citation

Solonar A. S., Yarmolik S. N., Khramenkov A. S., Mikhalkovski A. A. Features of use of Monte-Carlo method for approximation of statistical distributions of results of nonlinear transformations in radar-tracking problems. Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, physical-technical series. 2016, no. 4, pp. 91–98.

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ**  
**INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS**

УДК 621.396

Поступила в редакцию 02.10.2015  
Received 02.10.2015

**В. М. Чертков, В. К. Железняк**

*Полоцкий государственный университет, Новополоцк, Беларусь*

**АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПОИСКА  
С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ИДЕНТИФИКАЦИИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ  
СКРЫТОГО СЪЕМА ИНФОРМАЦИИ**

Дан обзор основных характеристик современных нелинейных радиолокаторов (НЛ). Выявлены основные факторы, негативно влияющие на здоровье оператора. Выполнен анализ перспективных методов поиска, обнаружения и идентификации радиоэлектронных средств (РЭС). Отмечено, что достоверность идентификации РЭС зависит от выбора системы критериев их классификации. Представлен принципиально новый способ распознавания типа полупроводника на основе использования специального зондирующего амплитудно-модулируемого сигнала с подавленной несущей (АМ-сигнал). Показана возможность автоматизированной идентификации на основе разработанного способа восстановления нелинейности. Представлены результаты одного из современных и разработанного способов в виде диаграммы показателей их работы. Разработана структурная схема аппаратно-программного комплекса, позволяющая с принципиально новой возможностью автоматизировать процессы поиска и идентификации РЭС. Статья описывает термин «идентификационный портрет». Приводится способ получения идентификационного портрета. Представлены реальные и восстановленные с помощью расчета коэффициентов аппроксимирующего полинома третьей степени вольт-амперные характеристики диодов И307Г и Д18. Приведены идентификационные портреты диодов И307Г и Д18.

*Ключевые слова:* идентификация, радиоэлектронное средство, скрытый съем информации, зондирующий АМ-сигнал с подавленной несущей, распознавание вида нелинейности, вольт-амперная характеристика.

**V. M. Chertkov, V. K. Zheleznyak**

*Polotsk State University, Novopolotsk, Belarus*

**A HARDWARE-SOFTWARE SYSTEM FOR AUTOMATED DETECTION WITH IDENTIFICATION  
OF COVERT RADIOELECTRONIC MEAN**

An overview of main characteristics of modern non-linear radiolocators is presented. The main factors that negatively affect the health of operator are identified. The analysis of the effective methods of searching, detection and identification of covert radioelectronic means is carried out. It is noted that the accuracy of the radio-electronic means identification depends on the selection criteria of the classification system. It presents a fundamentally new way to recognize the type of semiconductor based on the use of a special probing AM-signal with suppressed carrier (DSB-signal). The possibility of automated identification on the basis of developed method of nonlinearity recovery is demonstrated. The results of modern and developed methods in the form of a chart of their performance are provided. The block-diagram of hardware-software system developed for detection and identification of covert radioelectronic means is designed. The term «identity portrait» is described. A method for producing an identification portrait is introduced. The work presents the real current-voltage characteristics of I307G and D18 diodes and reconstructed ones performed by calculating the approximating polynomial coefficients of the third degree. Identification portraits of I307G and D18 diodes are provided.

*Keywords:* identification, covert radioelectronic means, the probing DSB-signal, the reduction method of nonlinearity, current-voltage characteristic

**Введение.** Нелинейные радиолокаторы (НЛ) являются одним из самых эффективных средств поиска, так как могут обнаруживать и определять местоположение любого скрытого электронного устройства независимо от активного или пассивного состояния (мины и взрыватели, SIM-карты мобильных телефонов, встроенные в бетонную стену РЭС скрытого съема информации и др.) [1]. В то же время они обладают ограниченными возможностями по распознаванию искомым РЭС. Реальная среда размещения РЭС представляет совокупность элементов строительной конструкции, включающей в себя различные металлические арматурные и крепежные соединения, что вносит неопределенность в правильную идентификацию объекта, вследствие чего увеличиваются время поиска и вероятность ложной тревоги. Разработка автоматизированной системы с более высокой достоверностью поиска, обнаружения и идентификации является актуальной задачей.

**Характеристики современных нелинейных радиолокаторов.** Существует множество моделей отечественных и зарубежных НЛ, работающих как в непрерывном, так и в импульсном режимах излучения. Основными параметрами современных НЛ при различных принципах организации их работы являются: мощность непрерывного излучения 2–4 Вт; мощность излучения в импульсном режиме до 300 Вт; частота зондирующего сигнала 650–1100 МГц; чувствительность приемника до –140 дБм; дальность обнаружения 0,5–2 м, при импульсном режиме до 10 м; дополнительный функционал.

Проникающая глубина электромагнитной волны зависит от мощности и частоты излучения. Поскольку с повышением частоты колебаний увеличиваются затухания электромагнитной волны в среде ее распространения, то уровень мощности переотраженного сигнала тем выше, чем ниже частота зондирования локатора. Однако при низкой частоте ухудшаются возможности по локализации места нахождения РЭС, так как при соизмеримых размерах его антенн с РЭС расширяется диаграмма направленности.

Следует отметить, что повышенная мощность излучения негативно влияет на оператора и для обеспечения его безопасности максимальная мощность излучения локатора в непрерывном режиме не должна превышать 2–4 Вт, при импульсном режиме работы локатора мощность излучения в импульсе достигает 300 Вт при средней мощности, не превышающей долей и единиц ватт.

Приемники нелинейных локаторов обеспечивают дальность обнаружения полупроводниковых элементов 0,5–2 м, а в импульсном режиме излучения – не более 10 м. Точность определения местонахождения скрытых объектов в двух режимах составляет единицы сантиметров.

Чувствительность приемника является не менее важной характеристикой для сравнения при оценке способности обнаружения НЛ. НЛ с мощностью излучения 2 Вт, но с качественным приемником, может обладать более высокими характеристиками обнаружения и работать эффективнее, чем прибор с мощностью излучения 4 Вт, но с худшими параметрами приемника [2].

Современные НЛ часто содержат дополнительные функции по обнаружению и распознаванию типов соединений (полупроводниковые или ложные). Каждый производитель стремится дополнить НЛ функциями, позволяющими повысить достоверность по распознаванию типов соединений: эффект затухания, применение аудиомодуляции, частотная совместимость [2].

**Анализ методов поиска, обнаружения и идентификации радиоэлектронных средств.** Анализ литературных источников показал, что термин «идентификация» часто воспринимается как распознавание типа нелинейности (искусственный или естественный полупроводник) элементов в составе РЭС скрытого съема информации. Авторами данной статьи предложено использовать термин «идентификация» как установление тождественности неизвестного объекта известному объекту на основании сравнения оценочных характеристик.

Процедура идентификации РЭС с помощью НЛ включает в себя три основных процесса, следующих друг за другом, которые рассмотрены в [3]:

1. Обнаружение РЭС по присутствию нелинейного соединения: обнаружение осуществляется по наличию гармоник и по определению их уровня в спектре переотраженного сигнала.

2. Распознавание типа соединения (полупроводник или ложный полупроводник): основывается на превышении уровня гармоник относительно друг друга на порядок 20 дБ в зависимости от типа соединения и нестабильности вольт-амперной характеристики (ВАХ) точечных и плоскостных металлических контактов при механическом воздействии.

3. Идентификация РЭС: принадлежность к определенному классу на основе системы критериев.

Функциональная возможность идентификации РЭС скрытого съема информации НЛ не предусмотрена. Идентификация (отнесение к определенному классу распознаваемых объектов) возможна лишь при проведении нескольких серий измерений в ручном или автоматизированном режиме. Достоверность идентификации в значительной мере зависит от выбора системы критериев, по которой в дальнейшем они классифицируются [4].

Из анализа принципа действия НЛ следует, что наиболее информативным критерием является вид ВАХ полупроводника [5], на основе которого разрабатываются современные алгоритмы и методы идентификации [6].

Авторами данной работы предложен принципиально новый способ распознавания типа полупроводника на основе использования специального зондирующего АМ-сигнала с подавленной несущей [7].

На рис. 1, *а*, представлены показатели одного из современных алгоритмов распознавания, суть которого основана на физических предпосылках различной скорости изменения уровней второй и третьей гармоник отраженного сигнала при снижении мощности от максимального до минимального сигнала зондирования [8]. Показатели правильного обнаружения для электронных и ложных объектов составляют 69 и 61% соответственно. Зона неопределенности для электронных объектов составляет менее 30%, а для помеховых объектов – примерно 35%. Вероятность ложной идентификации для обоих типов объектов составляет 3%.

Показатели предложенного способа на основе зондирующего АМ-сигнала (рис. 1, *б*) повышают вероятность правильного распознавания до 90% для электронных объектов и до 84% для ложных объектов, одновременно уменьшается зона неопределенности, которая для электронных объектов составляет менее 4%, а для помеховых объектов – примерно 13%. Вероятность ложной идентификации для обоих типов объектов составляет менее 1%.

На основе представленного способа разработан новый метод идентификации РЭС скрытого съема информации и спроектирован аппаратно-программный комплекс (АПК), который позволяет его реализовать.

**Структурная схема аппаратно-программного комплекса.** Современные нелинейные радиолокаторы используют микропроцессорную систему управления, которая позволяет уменьшить конструктивную сложность устройства при одновременном значительном расширении функциональных возможностей, сократить время поиска РЭС скрытого съема информации, упростить наладку и обслуживание такого оборудования за счет организации самопроверки [9].

Структурная схема АПК разрабатывалась для технической реализации способа распознавания типа полупроводника на основе использования специального зондирующего АМ-сигнала с подавленной несущей, структура которого представлена на рис. 2. Реализованный АПК управляется программным обеспечением MATLAB, алгоритм которого производит цифровую обработку информации, полученную при анализе переизлученного зондирующего сигнала. Созданная в MATLAB программа управления представляет собой функциональный алгоритм, задающий команды микроконтроллеру в составе АПК на синтезирование зондирующего сигнала и измене-

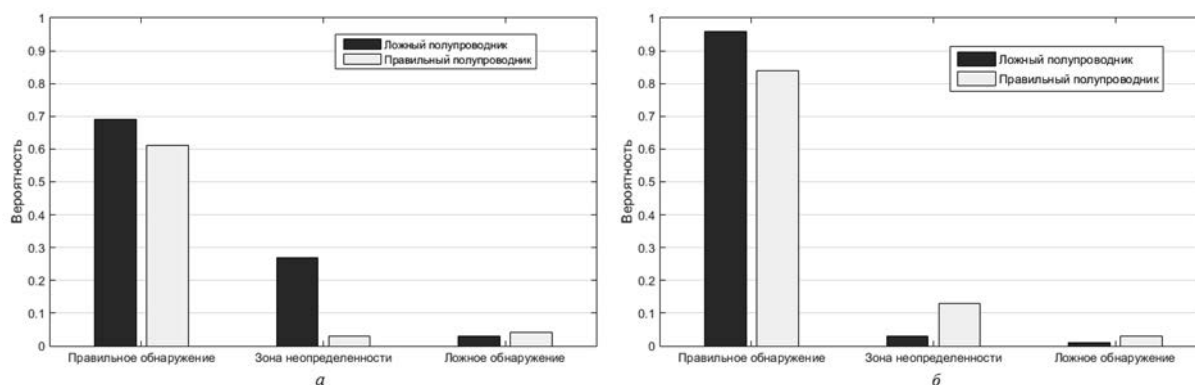


Рис. 1. Диаграмма показателей правильного и ложного обнаружения: *а* – показатели одного из современных алгоритмов распознавания; *б* – показатели предложенного способа на основе зондирующего АМ-сигнала

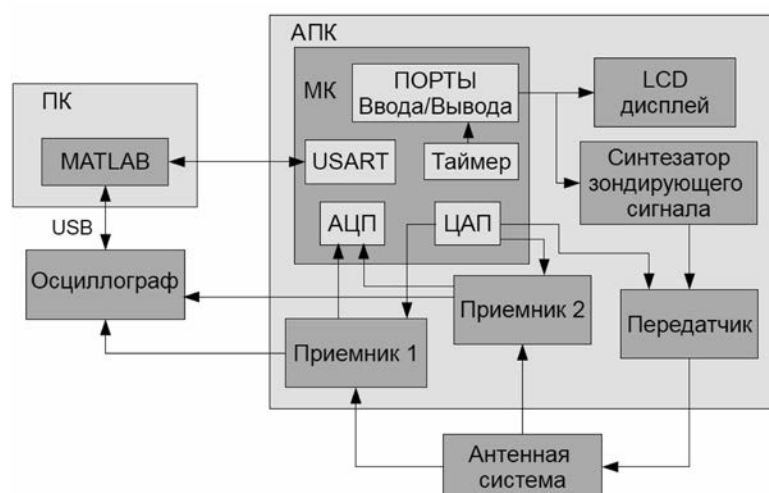


Рис. 2. Структура аппаратно-программного комплекса нелинейной радиолокации

ние его структуры. Также алгоритм регулирует уровень мощности излучения в зависимости от уровней, измеренных в каждом канале приема переотраженного от РЭС зондирующего сигнала, и идентифицирует его по результатам математической обработки получаемых данных. При этом появляется возможность эффективно исследовать нелинейность в области ее характерных частот, увеличить дальность действия НЛ, повысить достоверность идентификации РЭС скрытого съема информации.

Структура АПК включает в себя следующие элементы:

блок АПК: АПК нелинейной радиолокации без антенной системы и внешнего осциллографа;

блок ПК: персональный компьютер с программным обеспечением MATLAB для математической обработки и наглядной визуализации данных, измеренных с помощью внешнего осциллографа;

блок осциллограф: внешний осциллограф со встроенным АЦП, который управляется ПК с помощью программного обеспечения MATLAB. Предназначен для измерения данных, полученных в каждом канале приемника;

блок МК: микроконтроллер предназначен для управления различными режимами работы, выводом данных предварительной обработки, самодиагностика и настройка всех модулей АПК.

блок АЦП: аналого-цифровой преобразователь в составе микроконтроллера для обеспечения функции самодиагностики и предварительных результатов измерений;

блок ЦАП: цифроаналоговый преобразователь в составе микроконтроллера для управления мощностью передатчика, чувствительностью приемников, а также обеспечения нескольких режимов работы программного комплекса;

блок USART: универсальный последовательный приемопередатчик в составе микроконтроллера для обеспечения связи с ПК;

блок антенная система: набор антенн для передачи зондирующего АМ-сигнала и приема переотраженного от РЭС скрытого съема информации, в составе которого присутствуют радиоэлектронные компоненты.

Следует отметить, что вся система работает под управлением программного обеспечения MATLAB, установленного на ПК. Возможность организации такой системы рассмотрена в [10].

Отличительной особенностью АПК является использование прямой связи программного обеспечения MATLAB с оборудованием и периферийными устройствами, что позволит в автоматизированном режиме обработать результаты измерений и предоставить оператору сведения о характеристиках РЭС съема информации и тем самым ускорить их локализацию [11].

**Автоматизированная идентификация.** Важной отличительной особенностью разработанного метода является возможность автоматизации поиска и идентификации РЭС. Последняя производится на основе восстановленного вида ВАХ и идентификационного портрета, представ-

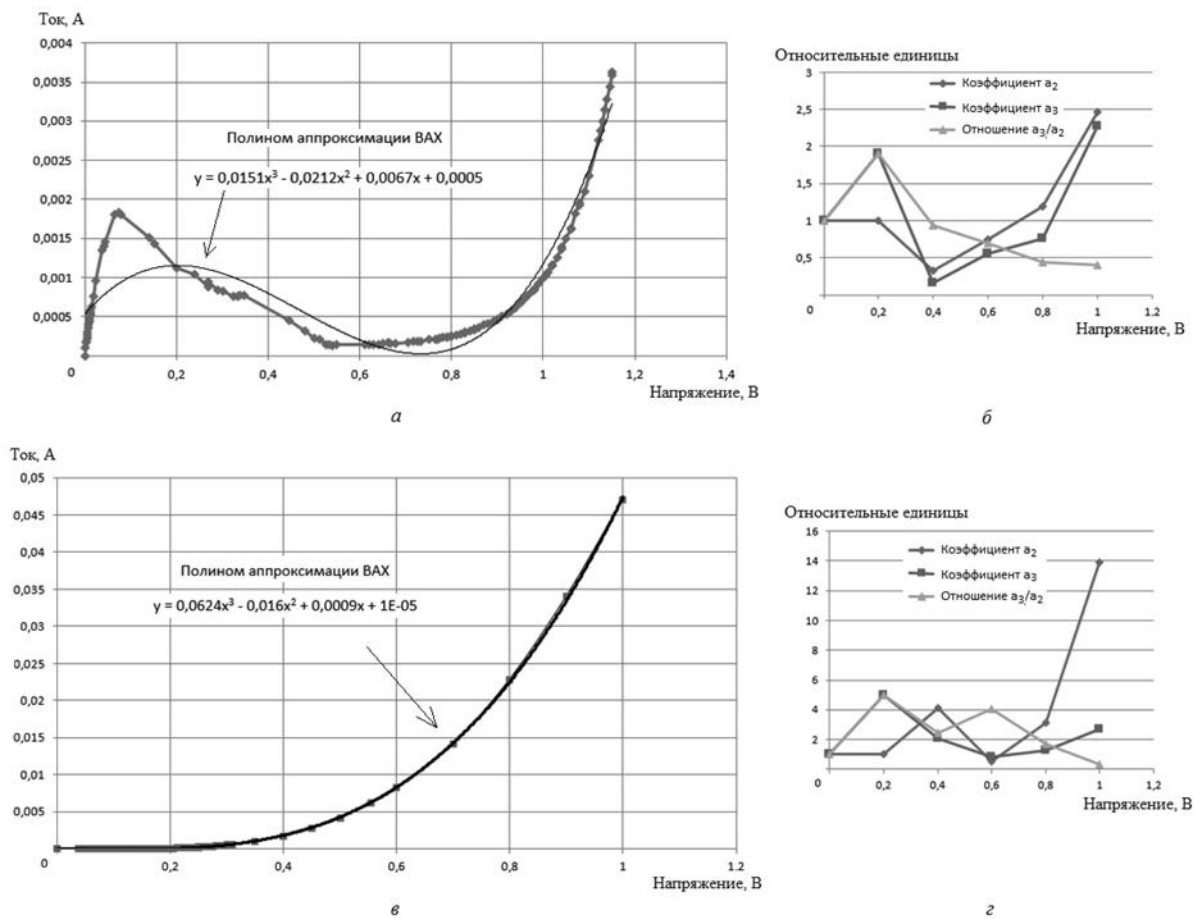


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика (а, в) и идентификационный портрет диодов ИЗО7Г (б), Д18 (г)

ляющего собой характер изменения коэффициентов аппроксимирующего полинома ВАХ, которые рассчитываются на каждом этапе увеличения мощности излучения и разности гармоник в составе зондирующего АМ-сигнала. Это позволит добиться вероятности правильной идентификации, близкой к единице. На рис. 3, а представлены реальная и восстановленная ВАХ на основе рассчитанных коэффициентов аппроксимированного полинома для диода ИЗО7Г, на рис. 3, б – его идентификационный портрет. На рис. 3, в, г показаны реальная и восстановленная ВАХ, а также идентификационный портрет диода Д18.

Идентификация предполагает поиск полученного радиолокационного портрета в имеющейся базе эталонов на основе максимума правдоподобия.

**Закключение.** Применение разработанного АПК и принципиально нового алгоритма идентификации РЭС существенно изменяет представление о возможностях нелинейной радиолокации применительно к задаче поиска РЭС скрытого съема информации. Их совместное применение позволит повысить достоверность идентификации РЭС скрытого съема информации, эффективность поиска и сократить время локализации РЭС. Операторы НЛ будут иметь возможность не только обнаружения, но и получения информации о характеристиках РЭС.

#### Список использованных источников

1. Чертков, В. М. Использование фазоманипулированного сигнала в задачах нелинейной радиолокации / В. М. Чертков, С.В. Мальцев // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С: Фундаментальные науки. – 2010. – № 3. – С. 129-134.
2. Джонс, Т. Х. Обзор технологии нелинейной локации [Электронный ресурс] / Т. Х. Джонс. – Режим доступа: [http://www.sinf.ru/catalog/sp\\_articles/article03.htm](http://www.sinf.ru/catalog/sp_articles/article03.htm). – Дата доступа: 05.11.2015.
3. Чертков, В. М. Определение электрофизических свойств объекта методами нелинейной радиолокации / В. М. Чертков, С. В. Мальцев // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С: Фундаментальные науки. – 2012. – № 4. – С. 99–102.

4. Чертков, В. М. Идентификация радиоэлектронных средств скрытого съема информации средствами нелинейной радиолокации / В. М. Чертков, В. К. Железняк // Современные средства связи: материалы XX Междунар. науч.-техн. конф., 14–15 окт. 2015 года, Минск, Респ. Беларусь; редкол.: А.О. Зеневич [и др.]. – Минск: УО ВГКС, 2015. – С. 210–211.
5. Чертков, В. М. Повышение надежности идентификации нелинейных объектов / В. М. Чертков, С. В. Мальцев // Информатика, математическое моделирование, экономика: сборник науч. статей по итогам III Междунар. науч.-прак. конф., г. Смоленск, 24–26 апреля 2013 г. В 3-х т. Т. 2. – Смоленск: Смоленский филиал Российского университета кооперации. 2013. – С. 77–80.
6. Чертков, В. М. Поиск и обнаружение нелинейных объектов с распознаванием типа нелинейности на основе их электрофизических свойств / В. М. Чертков, С. В. Мальцев // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С: Фундаментальные науки. – 2013. – № 4. – С. 105–109.
7. Чертков, В. М. Метод повышения достоверности идентификации закладных устройств с применением DSB-сигнала / В. М. Чертков, В. К. Железняк // Интеллектуальные системы на транспорте: материалы V междунар. науч.-прак. конф. «ИнтеллектТранс-2015». – СПб.: ПГУПС, 2015. – С. 293–298.
8. Каргашин, В. Л. Нелинейная ближняя радиолокация. Новые алгоритмы идентификации электронных устройств / В. Л. Каргашин, В. Н. Ткач, Д. В. Ткачев // Специальная техника. – 2006. – № 6. – С. 42–48.
9. Чертков, В. М. Программное управление аппаратно-программным комплексом автоматизированного поиска радиоэлектронных средств скрытого съема информации / В. М. Чертков, В. К. Железняк // Информационные технологии и системы 2015 (ИТС 2015): материалы междунар. научной конференции, 28 окт. 2015 года, Минск, Респ. Беларусь / БГУИР; редкол.: Л. Ю. Шилин [и др.] – Минск: БГУИР, 2015. – с. 34–35.
10. Чертков, В. М. Модель системы управления на основе обработки и анализа данных в режиме реального времени инструментами matlab / В. М. Чертков // Техника и технология: новые перспективы развития. – 2014. – № XV. – С. 111–118.
11. Способ обнаружения нелинейного объекта с идентификацией типа нелинейности : пат. 19665 Респ. Беларусь, G 01S 13/00 (2006.01), G 01S 13/88 (2006.01) / В. М. Чертков, С. В. Мальцев; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № a20121580; заявл. 16.11.2012 г. опубл. 30.12.2015 г. // Официальный бюл. / Нац. центр интеллектуал. собственности. – 2015. – № 6. – С. 76.

## References

1. Chertkov, V. M. and Maltsev, S.V. (2010), "Phase-keying signal utilization for nonlinear radar location tasks", *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya S: Fundamental'nye nauki* [Herald of Polotsk State University. Series C, Fundamental sciences], no. 3, pp. 129–134.
2. Dzgons, T. H. "Obzor tekhnologii nelineynoy lokatsii", Available at: [http://www.sinf.ru/catalog/sp\\_articles/article03.htm](http://www.sinf.ru/catalog/sp_articles/article03.htm), (Accessed 05 November 2015).
3. Chertkov, V. M. and Maltsev, S. V. (2012), "Determination of object's electrophysical properties by methods of nonlinear radiolocation", *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya S: Fundamental'nye nauki* [Herald of Polotsk State University. Series C, Fundamental sciences], no. 4, pp. 99–102.
4. Chertkov, V. M. and Zheleznyak, V. K. (2015), "Nonlinear radar for identification of hidden radio-electronic", *Sovremennye sredstva svyazi: materialy XX Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Articles XX International scientific-technical conference «Modern means of communication»], Minsk, BY, pp. 210–211.
5. Chertkov, V. M. and Maltsev, S. V. (2013), "Improving the reliability of the identification of nonlinear objects", *Informatika, matematicheskoe modelirovanie, ekonomika: sbornik nauch. statei po itogam III Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Collection of scientific articles on the results of the III scientific-technical conference «Information technology, mathematical modeling, the economy»], Smolensk, RU, vol. 2, pp. 77–80.
6. Chertkov, V. M. and Maltsev, S. V. (2013), "The search and detection of non-linear objects with recognition of nonlinearity based on their electrophysical properties", *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya S: Fundamental'nye nauki* [Herald of Polotsk State University. Series C, Fundamental sciences], no. 4, pp. 105–109.
7. Chertkov, V. M. and Zheleznyak, V. K. (2015), "The Method for increasing reliability of the identification of embedded devices using DSB-signal", *Intellektual'nye sistemy na transporte: Materialy V mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "IntellektTrans-2015"* [Articles V International scientific-practical conference «Intelligent transport systems (IntellektTrans-2015)»], St. Petersburg, RU, pp. 293–298.
8. Kargashin, V. L., Tkach, V. N. and Tkachev, D.V. (2004), "Nonlinear short-range radar. New algorithms for the identification of electronic devices", *Spetsial'naya Tekhnika* [Special Technics], no. 6, pp. 42–48.
9. Zheleznyak, V. K. (2015), "Software control of hardware-software system for automated search of hidden radio-electronic means", *Informatsionnye tekhnologii i sistemy 2015 (ITS 2015): materialy mezhdunar. nauchnoi konferentsii* [Articles of the International Scientific Conference «Information Technologies and Systems 2015 (ITS 2015)»], Minsk, BY, pp. 34–35.
10. Chertkov, V. M. (2014), "The control system model based on processing and analysis data in real time of instruments MATLAB", *Tekhnika i tekhnologiya: novye perspektivy razvitiya* [Technique and technology: new prospects], no. 15, pp. 111–118.
11. Chertkov, V. M. and Maltsev, S.V. (2015), *Sposob obnaruzheniya nelineinogo ob'ekta s identifikatsiei tipa nelineinosti* [The method for detecting non-linear object with an identification type of the nonlinearity], BY, Pat. 19665.



### Информация об авторах

*Железняк Владимир Кириллович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиоэлектроники. Полоцкий государственный университет (211440, Витебская обл., г. Новополоцк, ул. Блохина, 29, Беларусь). E-mail: v.zheleznjak@psu.by

*Чертков Валерий Михайлович* – магистр технических наук, старший преподаватель кафедры радиоэлектроники. Полоцкий государственный университет (211440, Витебская обл., г. Новополоцк, ул. Блохина, 29, Беларусь). E-mail: v.chertkov@psu.by

### Для цитирования

Чертков, В. М. Аппаратно-программный комплекс автоматизированного поиска с возможностью идентификации радиоэлектронных средств скрытого съема информации / В. М. Чертков, В. К. Железняк // Вес. Нац. акад. Сер. фіз.-тэх. навук – 2016. – № 4. – С. 99–105.

### Information about the authors

*Zheleznyak Vladimir Kirillovich* – D. Sc. (Engineering), Professor, Head of Department of Radio Electronics. Polotsk State University. (29 Blokhina str., 211440, Novopolotsk, Belarus). E-mail: v.zheleznjak@psu.by

*Chertkov Valery Mihailovich* – master of engineering, senior lecturer, the Department of Radio Electronics. Polotsk State University (29 Blokhina str., 211440, Novopolotsk, Belarus). E-mail: v.chertkov@psu.by

### For citation

Chertkov V. M, Zheleznyak V. K. A Hardware-software system for automated detection with identification of covert radioelectronic mean. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, physical-technical series*. 2016, no. 4, pp. 99–105.

**А. А. Борискевич**

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь*

### **УСТОЙЧИВЫЙ МЕТОД НОРМАЛИЗАЦИИ ОТСКАНИРОВАННОГО МОБИЛЬНЫМ УСТРОЙСТВОМ ИЗОБРАЖЕНИЯ ШТРИХКОДА**

Разработан метод нормализации отсканированного мобильным устройством изображения штрихкода, основанный на итерационной пороговой бинаризации, формировании контурного бинарного изображения, преобразовании Хафа, коррекции позиций угловых граничных точек и проективном преобразовании плоскости. Представлены результаты компьютерного моделирования. Данный метод обеспечивает инвариантность к условиям печати и съемки (к вращению изображения в диапазоне от  $-45^\circ$  до  $45^\circ$  и неравномерному освещению изображений штрихкода) за счет использования процедур предварительной обработки, локализации граничных угловых точек и компенсации геометрических искажений цифровых изображений штрихкода.

*Ключевые слова:* изображение штрихкода, контурное бинарное изображение, преобразование Хафа, локализация граничных точек, проективное преобразование, мобильное устройство.

**A. A. Boriskevich**

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus*

### **A ROBUST METHOD FOR NORMALIZATION OF BARCODE IMAGES SCANNED WITH A MOBILE DEVICE**

A robust method of normalizing barcode images scanned with a mobile device based on iterative threshold binarization, forming the edge binary image, Hough transform, correction of the angular position of the boundary points and the projective transform is developed. The results of the computer simulation are presented. The method provides the invariance to conditions of printing and lightening (image rotation invariance in the range from  $-45^\circ$  to  $45^\circ$ , and noninform barcode image illumination invariance) due to using procedures of preprocessing, boundary corner point localization and geometric distortion compensation of the digital barcode images.

*Keywords:* barcode image, binary edge image, Hough transform, boundary point localization, projective transform, mobile phone

**Введение.** В настоящее время разработано множество двумерных (2D) штриховых кодов, представляющих собой последовательность черных и белых вертикальных прямоугольников различной ширины или других геометрических фигур, характеризуемых различным соотношением занимаемое место/количество информации [1]. Основными параметрами при выборе сканера штрихкода являются его способность считывать/декодировать определенный тип штрихового кода, невысокие требования к его стоимости, качеству и скорости сканирования штрихкодов, условиям печати и освещения. Сканеры штрихкода можно разделить на светодиодные CCD (Charge-Coupled Device, прибор с зарядовой связью)-матрицы, лазерные, Linear Image (линейный фотосканер) и Area Image (матричный фотосканер для считывания двумерных штрихкодов с мини-камерой и современными алгоритмами распознавания и декодирования) [1]. Возможности использования мобильных устройств для надежного считывания и декодирования штрихкодов ограничены достаточно высокими требованиями к условиям печати и съемки. Изображения, полученные с помощью мобильных телефонов, характеризуются неоднородным освещением, размытием и геометрическими искажениями. Последние обусловлены углом съемки мобильным телефоном, размытие обусловлено небольшим размером сенсора, отсутствием автофокуса у телефона, близким расстоянием от мобильного телефона до снимаемого изображения штрихкода, нестабильностью положения мобильного телефона. Это обуславливает актуальность решения задачи надежного декодирования штрихкодов и изображений с внедренной в условиях неравномерной освещенности и различных геометрических искажений.



Рис. 1. Блок-схема устойчивого метода нормализации захваченного мобильным устройством изображения штрихкода

Предложен устойчивый метод обработки изображения штрихкода при считывании мобильным устройством (рис. 1), основанный на формировании его контурного бинарного изображения, обнаружении угловых граничных точек, коррекции позиций угловых граничных точек и нормализации (компенсация геометрических искажений) изображения штрихкода.

**Метод компенсации геометрических искажений изображений штрихкода.** Для обеспечения устойчивости к неравномерному освещению исходного штрихкода  $I = (I(i, j) | i = j = N)$  (рис. 2) предлагается процедура формирования бинарного контурного изображения, основанная на методе Оцу (Otsu) [2] и алгоритме Канни (Canny) [3], определяемая с помощью следующих систем соотношений:

$$\left\{ \begin{array}{l} B(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{при } I(i, j) \geq T_{opt}, \\ 0 & \text{при } I(x, y) < T_{opt}, \end{cases} \\ \sigma_{12}^2(T) = w_1(T)w_2(T) (\mu_1(T) - \mu_2(T))^2, \\ T_{opt} = \arg \max_T \sigma_{12}^2(T), \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} B_S(i, j) = B(i, j) * h(i, j) = \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^M B(k, l) h_S(i-k, j-l), \\ B_{SGx(y)}(i, j) = B_S(i, j) * h_{Gx(y)}(i, j) = \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^M B_S(k, l) h_{Gx(y)}(i-k, j-l), \\ |B_{SGxy}(i, j)| = \sqrt{B_{SGx}^2(i, j) + B_{SGy}^2(i, j)}, \\ \theta_{GSxy}(i, j) = \arctg(B_{GSy}(i, j) / B_{GSx}(i, j)), \\ |B_{SGxy}(i, j)| = \begin{cases} |B_{SGxy}(i, j)| & \text{при } |B_{SGxy}(i', j')| < |B_{SGxy}(i, j)| > |B_{SGxy}(i'', j'')|, \\ 0 & \text{иначе} \end{cases} \\ B_{cont}(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{при } B(i, j) > T_H \text{ и } T_L \leq B(i, j) \leq T_H, \\ 0 & \text{при } B(i, j) < T_L \text{ и } T_L \leq B(i, j) \leq T_H, \end{cases} \end{array} \right. \quad (2)$$

где  $w_1(T) = \sum_{i=1}^T p_i$  и  $w_2(T) = \sum_{i=T+1}^{T_{max}} p_i$  – вероятности первого и второго классов гистограммы изображения штрихкода с учетом порога  $T \in [1, T_{max}]$ , разделяющего первый и второй классы,  $p_i = n_i / N^2$ ,  $n_i$  – вероятность и количество появлений пикселей с  $i$ -м значением в изображении размером  $N \times N$ ;  $\mu_1(T) = \sum_{i=1}^T i p_i / w_1$ ,  $\mu_2(T) = \sum_{i=T+1}^{T_{max}} i p_i / w_2$ ,  $\sigma_{12}^2(T)$  – матожидания значений первого и второго классов, межклассовая дисперсия гистограммы изображения штрихкода соответственно;  $h_S = (h_S(i, j, \sigma) = (2\pi\sigma^2)^{-1} \exp(-(i^2 + j^2))_{M \times M}$  – низкочастотная гауссова маска с разме-

ром  $M \times M$  со среднеквадратическим отклонением  $\sigma$  распределения Гаусса,  $h_{Gx} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$

и  $h_{Gy} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{pmatrix}$  – маски Собеля размером  $3 \times 3$  для оценки градиента в горизонтальном (x)

и вертикальном (y) направлениях;  $B = (B(i, j))$ ,  $B_S = (B_S(i, j))$ ,  $B_{SGxy} = (B_{SGxy}(i, j))$  – бинарное, сглаженное полутоновое и контурное полутоновое без коррекции изображения соответственно;  $(i', j')$ ,  $(i'', j'')$  – координаты точек  $|B_{SGxy}|$ , соседних с  $(i, j)$ , вдоль направления, перпендикулярного к контурной линии,  $|B_{SGxy}(i, j)|$  и  $\theta_{GSxy}(i, j) \in \{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ\} = \arctg(B_{GSy}(i, j)/B_{GSx}(i, j))$  – величина или модуль вектора градиента (сила контура границы) изображения в точке  $(i, j)$  и значения угла направления вектора градиента контура, округляемые до ближайшего угла, кратного  $45^\circ$ .

Алгоритм обнаружения контурных линий объектов или детектор контуров Канни [3] является оптимальным для определенного класса контуров (ступенчатый контур) и обеспечивает «хорошее» обнаружение (минимизация вероятностей появления ложных контуров и их пропусков) и локализацию контуров (обнаруженные контуры должны быть как можно ближе к реальным контурам) при минимальном отклике в области шума.

Сглаженное изображение  $B_S = (B_S(i, j))$  обеспечивает компромисс между фильтрацией шума и локализацией контуров. Утоньчение контуров осуществляется посредством применения процедуры исключения пикселей, которые не являются локальными максимумами величины вектора градиента  $|B_{SGxy}(i, j)|$  в направлении вектора градиента. Канни-детектор использует двухпороговую процедуру формирования двух изображений с использованием верхнего  $T_H$  и нижнего  $T_L$  порогов ( $T_L < T_H$ ), первое из которых содержит малое количество контуров, но имеет разрывы в контурах, а второе – большое число ложных контуров и процедуру связывания пикселей в контур. Пиксели, значение  $|B_{SGxy}(i, j)|$  в которых больше  $T_H$ , называются сильными, а пиксели, значения которых попадают в интервал  $[T_L, T_H]$ , называются слабыми. Алгоритм формирования контурного бинарного изображения  $B_{cont} = (B_{cont}(i, j))$  завершается операцией соединения пикселей в контуры, в процессе которой к сильным пикселям добавляются слабые, которые находятся вместе с сильными пикселями в области определенного размера.

Из-за нестабильного углового позиционирования мобильной камеры относительно плоскости штрихкода формируемое изображение подвергается геометрическим преобразованиям. Следовательно, для компенсации геометрических искажений разработана процедура локализации четырех крайних угловых точек штрихкода, основанная на обнаружении граничных вертикальных или горизонтальных линий и локальной коррекции позиций четырех угловых граничных точек.

Процедура локализации граничных линий изображения штрихкода  $I = (I(i, j) | i = j = N)$  основана на преобразовании координат точек  $(i, j)$  бинарного контурного изображения  $B_{cont} = (B_{cont}(i, j))$  в  $(\rho, \theta)$ -пространство с помощью стандартного преобразования Хафа [4], основанного на параметрическом представлении контурной линии в виде  $L_{\rho, \theta} = \{(i, j) | \rho = i \cos \theta + j \sin \theta\}$ , где  $\rho$  и  $\theta$  – расстояние от начала координат до линии вдоль вектора и угол в градусах между перпендикуля-

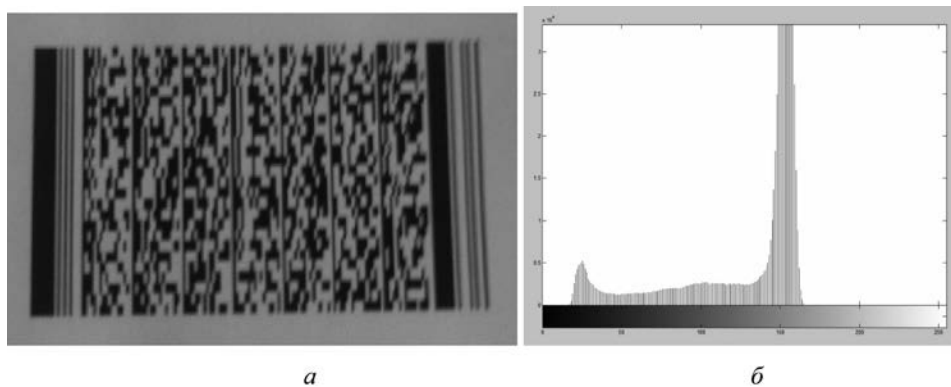


Рис. 2. Исходное цифровое изображение штрихкода: а – штрихкод с граничными вертикальными линиями; б – гистограмма значений пикселей изображения штрихкода

ром к линии и осью  $x$ . В результате формируется матрица параметрического пространства  $H = (H(\rho, \theta))$  размером  $2 \lceil N\sqrt{2}/\Delta\rho \rceil \times 2 \lceil 90^\circ/\Delta\theta \rceil$ , строки и столбцы которой соответствуют значениям  $\rho \in [-d, d]$  и  $\theta \in [-90^\circ, 90^\circ]$  с разрешением  $\Delta\rho$  и  $\Delta\theta$ , где  $d$  – расстояние между угловыми точками изображения, а пиковые значения ее ячеек накопления размером  $\Delta\rho \times \Delta\theta$  определяются числом пикселей контурной линии изображения  $B_{cont} = (B_{cont}(i, j))$ . Чем длиннее линия в изображении  $B_{cont} = (B_{cont}(i, j))$ , тем больше ее максимум в  $H = (H(\rho, \theta))$ . Например,  $Q$  точек на прямой линии в  $(i, j)$ -пространстве соответствует  $Q$  синусоидальным кривым  $L_{\rho, \theta} = \left\{ (i, j) \mid \rho_k = i \cos \theta_k + j \sin \theta_k, k = \overline{1, Q} \right\}$  в  $(\rho, \theta)$ -плоскости, пересекающимся в одной и той же  $(\rho_i, \theta_j)$ -ячейке накопления. В этом случае  $H(\rho, \theta) = Q$ . Выбор величины шагов разбиения  $(\rho, \theta)$ -пространства определяет точность попадания точек на формируемую прямую и вычислительную сложность преобразования Хафа.

Для формирования угловых граничных точек первоначально находятся две максимально удаленные друг от друга линии с  $k_1 = \arg \min (\rho(k, \theta(l)))$  и  $k_2 = \arg \max (\rho(k, \theta(l)))$ , где  $k$  – индексы  $\rho$  изображения штрихкода для каждого выбранного угла  $\theta(l)$ , где значения ячеек матрицы  $\max (H(\rho(k), \theta(l)))$  превышают пороговую величину  $H_{Th}$ .

Короткие линии отбрасываются с помощью использования порогового значения  $T_L = (\alpha/n_L) \sum_{l=1}^{n_L} L_l(\rho, \theta)$  для всех линий  $k_{1l}$  и  $k_{2l}$ , где  $\alpha = 1/4$  – эмпирический коэффициент;  $n_L$  – общее число обнаруженных линий  $L_l$  с помощью преобразования Хафа. После того, как линии классифицированы с помощью углов  $\theta$ , определенное пороговое значение  $T_\theta$  может быть выбрано для сгруппирования линий в два класса, соответствующих горизонтальному и вертикальному направлениям.

Две линии, максимально удаленные друг от друга, будут считаться параллельными, если они не превышают максимально допустимого порогового отклонения  $T_\theta = 22^\circ$  в угловой ориентации. Выбор порогового значения  $T_\theta$  зависит от условий съемки. Две граничные линии в каждой категории, удовлетворяющие условию  $|\theta(l_i) - \theta(l_j)| < T_\theta$ , определяются с помощью соотношения  $(m, n) = \arg \max_{m, n} |\rho(m, \theta(l_i)) - \rho(n, \theta(l_j))|$ , где  $m$  и  $n$  – индексы  $\rho$ , определенные с помощью выбора значений  $\theta = \theta(l_i)$  и  $\theta = \theta(l_j)$  соответственно. В результате первоначально локализованные угловые точки являются начальной и конечной точками двух граничных почти параллельных линий.

Поскольку линии изображения штрихкода в общем случае не являются прямыми и могут быть кривыми из-за искажений линз мобильной камеры, ее неплоскостности и ручного считывания, то это ухудшает локализацию граничных линий и их угловых точек с помощью преобразования Хафа. В связи с этим разработана процедура селективной коррекции позиций угловых точек граничных линий [5], основанная на прослеживании и локальной обработке выделенных двух максимально удаленных друг от друга граничных линий, содержащих искомые угловые точки, и поиске направлений текущей угловой точки и следующей угловой точки-кандидата в окрестности  $3 \times 3$  в восьми направлениях  $\{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$  посредством вычисления множества  $\{g_w\}$  весовых коэффициентов изменения направления и установления ограничений на максимальное изменение направления.

Предварительная обработка пикселей контурного изображения  $B_{cont} = (B_{cont}(i, j))$ , принадлежащих вертикальным граничным линиям  $H_L$ , содержащим угловые точки, обнаруженные с помощью преобразования Хафа, заключается в установке их флагов (индикаторов) в состояние 1, а флагов остальных контурных пикселей  $B_{cont}$  – в установку в состояние 0. Поиск направления текущей угловой точки осуществляется с помощью анализа окрестности  $3 \times 3$  данной точки на контурном бинарном изображении  $B_{cont}$ . Если флаг одного из пикселей окрестности имеет состояние 1, то одно направление из восьми считается найденным и равным  $D_{ссп}$ . В противном случае процесс поиска продолжается. Прослеживанием вдоль найденного направления  $D_{ссп}$  осуществляется поиск следующей угловой точки-кандидата, флаг которой должен быть в состоянии 0, указывающем на то, что она никогда не была включена в  $H_L$ . Для идентификации следую-

шей угловой точки-кандидата оценка  $\Delta D$  изменения направления от  $i$ -го до  $j$ -го направлений (например, от текущей к следующей угловой точке, от текущей или следующей угловой точки к вертикальному направлению) определяется с помощью соотношения  $\Delta D(i, j) = |D(i) - D(j)|$ , где  $D(i)$  и  $D(j)$  – значения направлений из множества  $\{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$ . Оценка весовых коэффициентов  $g_w \in \{0, 3, 8\}$ , присваиваемых каждому изменению направления  $\Delta D(i, j)$ , осуществляется с помощью соотношения  $g_w = \begin{cases} 0 & \text{при } \text{mod}(\Delta D(i, j), 4) = 0, \\ 3 & \text{при } \text{mod}(\Delta D(i, j), 4) = 1 \vee 3, \\ 8 & \text{при } \text{mod}(\Delta D(i, j), 4) = 2. \end{cases}$

Для исключения ложных направлений и выделения значимого изменения направления сумма трех весовых коэффициентов  $g_w$ , присваиваемых изменениям направления  $\Delta D(i, j)$  от текущей к следующей угловой точке, от текущей или следующей угловой точки к вертикальному направлению, не должна превышать определенное пороговое значение  $N_{th}$  (например,  $N_{th}=9$ ).

Процесс обновления позиции граничной угловой точки продолжается до тех пор, пока существует следующий кандидат на угловую граничную точку. Конечным результатом данной процедуры являются четыре угловые граничные точки изображения в координатном пространстве.

Коррекция геометрических искажений, или нормализация исходного изображения, осуществляется по локализованным четырем угловым граничным точкам с помощью плоскостно-проекционного преобразования  $H$  в виде композиции проекционного  $H_S$ -, аффинного  $H_A$ - и метрического  $H_P$ -преобразований.

Процедура компенсации геометрических искажений изображения штрихкода  $I = (I(i, j) | i = j = N)$ , основанная на использовании локализованных угловых граничных точек, формирующих вектор  $v = (v_1, v_2, v_3)^T$  бесконечно удаленной линии, проходящей через исчезающие точки, и плоскостно-проекционного преобразования  $H$  [6], осуществляется с помощью соотношения, корректирующего координаты  $(x \ y \ 1)^T$  пикселей изображения штрихкода в нормализованные координаты  $(x_H \ y_H \ 1)^T$ :

$$\begin{cases} (x_H \ y_H \ 1)^T = H(x \ y \ 1)^T, \\ H = H_S H_A H_P, \end{cases} \quad (3)$$

где  $H_S = \begin{pmatrix} s \cos \varphi & -s \sin \varphi & t_x \\ s \sin \varphi & s \cos \varphi & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ ,  $H_P = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ v_1 & v_2 & v_3 \end{pmatrix}$ ,  $H_A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -\text{ctg} \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ ;  $s, \varphi,$

$t = (t_x, t_y)^T$ ,  $\theta$  – коэффициент изотропного масштабирования, угол между горизонтальной парой параллельных линий и горизонтальной осью  $x$ , двумерный вектор перемещений, угол, восстанавливающий ортогональность между горизонтальной парой параллельных линий и вертикальной парой параллельных линий, задающих горизонтальное и вертикальное направления, соответственно.

**Результаты моделирования.** Компьютерный эксперимент проводился с использованием камеры мобильного телефона 3 Мп с разрешением 2048×1536 пикселей. На рис. 3–5 представлены

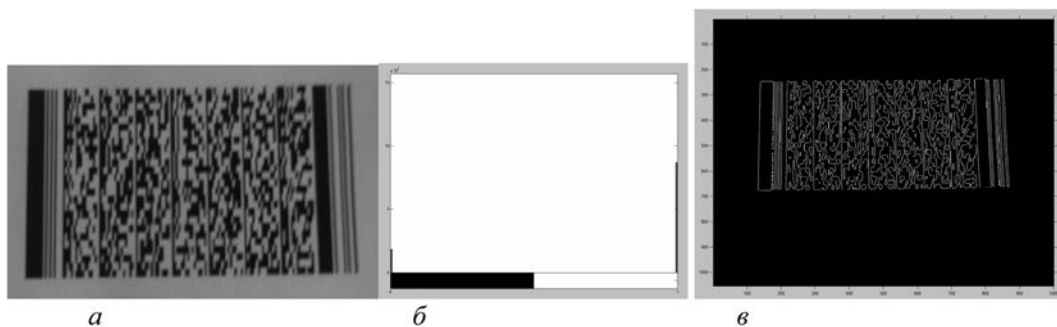


Рис. 3. Процедура предварительной обработки изображения штрихкода:  $a$  – бинарное изображение;  $b$  – гистограмма бинарного изображения,  $c$  – бинарное контурное изображение

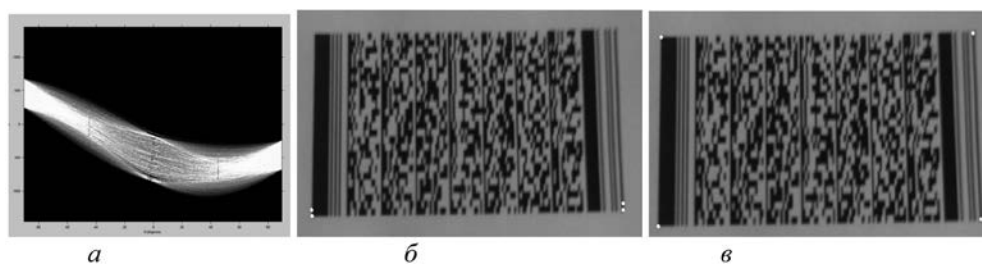


Рис. 4. Процедура коррекции угловых граничных точек изображения штрихкода: *a* – преобразование Хафа бинарно-контурного изображения в параметрическом пространстве; *б* – изображение штрихкода с первоначально обнаруженными угловыми граничными точками; *в* – изображение штрихкода с скорректированными угловыми граничными точками

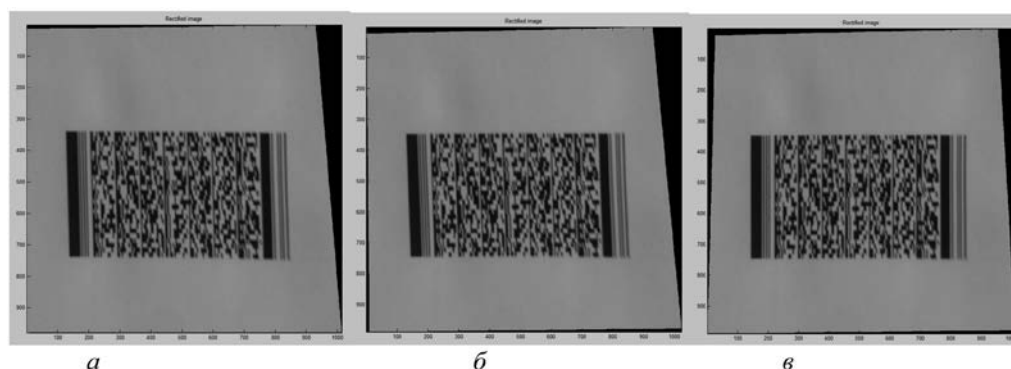


Рис. 5. Процедура коррекции геометрических искажений изображения штрихкода: *a* – без проекционных искажений; *б* – без проекционных и метрических искажений; *в* – нормализованное изображение

результаты моделирования процедур обработки цифрового изображения штрихкода (рис. 2) при различных условиях печати и съемки. Из полученных данных следует, что разработанный метод обеспечивает устойчивую нормализацию изображений за счет инвариантности к углу съемки мобильным телефоном в диапазоне от  $-45^\circ$  до  $45^\circ$  и к неравномерному освещению изображений штрихкода.

**Заключение.** Предложен устойчивый метод нормализации изображения штрихкода, полученного с помощью мобильного устройства, основанный на его предварительной обработке и компенсации геометрических искажений по локализованным четырем угловым граничным точкам с помощью плоскостно-проекционного преобразования.

Данный метод обеспечивает инвариантность к условиям печати и съемки (к вращению изображения в диапазоне от  $-45^\circ$  до  $45^\circ$  и неравномерному освещению изображений штрихкода) за счет предварительной обработки изображения и двухэтапной процедуры локализации граничных угловых точек, первый этап которой включает в себя формирование первичных позиций угловых граничных точек, а второй этап – уточнение позиций угловых граничных точек в локальной окрестности определенного размера вдоль контурных граничных линий и компенсация геометрических искажений с помощью плоскостно-проекционного преобразования.

Разработанный метод может быть использован для нормализации как изображения штрихкода, так и маркированных изображений с идентифицирующей рамкой, несущих конфиденциальную информацию.

#### Список использованных источников

1. Классификация сканеров штрихкодов. [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: <http://prime63.ru/klassifikatsiya-skanerov-shtrih-kodov.html> – Дата доступа: 06.07.2016
2. Otsu, N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms / N.A Otsu // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. – 1979. – Vol. 9, N 1. – P. 62–66.

3. Canny, J. A Computational approach to edge detection / J. Canny // *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*. – 1986. – Vol. 8, N 6. – P. 679–698.
4. Duda, R.O. Use of the Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures / R. O. Duda, P. E. Hart // *Comm. ACM*. – 1972. – Vol. 15. – P. 11–15.
5. Yang, H. Accurate localization of four extreme corners for barcode images captured by mobile phones / H. Yang, X. Jiang, A. C. Kot // *Proceedings of 2010 IEEE 17th International Conference on Image Processing*. – 2010. – P. 3897 – 3900.
6. Чехлов, Д. О. Нормализация изображений относительно перспективного преобразования на основе геометрических параметров / Д. О. Чехлов, С. В. Абламейко // *Информатика*. – 2004. – № 3. – С. 67–76.

### References

1. (2016), "Classification of barcode scanners", Available at: <http://prime63.ru/klassifikatsiya-skanerov-shtrih-kodov.html>, (Accessed 06.07.2016).
2. Otsu, N. A. (1979), "Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 9, no. 1, pp. 62–66.
3. Canny, J. (1986), "A Computational approach to edge detection", *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 8, no. 6, pp. 679–698.
4. Duda, R.O. and Hart, P.E. (1972), "Use of the Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures", *Communications of the ACM*, vol. 15, pp. 11–15.
5. Yang, H., Jiang, X. and Kot, A. C. (2010), "Accurate localization of four extreme corners for barcode images captured by mobile phones", *Proceedings of 2010 IEEE 17th International Conference on Image Processing*, pp. 3897–3900.
6. Chekhlov D.O. and Ablamejko S.V. (2004), "Normalization of images relative to perspective transformation on the basis of geometrical parameters", *Informatika* [Computer science], no. 3, pp. 67–76.

### Информация об авторе

Борискевич Анатолий Антонович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры сетей и устройств телекоммуникаций. Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (220013, г. Минск, ул.П.Бровки, 6, Беларусь). E-mail:anbor@bsuir.by

### Information about the author

Boriskevich Anatoly Antonovich – D. Sc. (Engineering), Assistant Professor, Professor of Telecommunication Networks and Devices chair. Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, P. Browki str., 220013, Minsk, Belarus). E-mail:anbor@bsuir.by.

### Для цитирования

Борискевич А. А. Устойчивый метод нормализации отсканированного мобильным устройством изображения штрихкода / А. А. Борискевич // *Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук*. – 2016. – № 4. – С. 106–112.

### For citation

Boriskevich A. A. A robust method for normalization of barcode images scanned with a mobile device. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, physical-technical series*. 2016, no. 4, pp. 106–112.



**С. А. Золотой, А. В. Косило, А. А. Ставров, И. Б. Страшко**

*Научно-инженерное республиканское унитарное предприятие «Геоинформационные системы»,  
Минск, Беларусь*

## **НЕКОТОРЫЕ ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ БЕЛОРУССКОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

Обсуждаются возможности улучшения характеристик Белорусской космической системы дистанционного зондирования Земли, вытекающие из реализации ее многоуровневой информационно-интегрированной структуры. Предлагаемая конфигурация многоуровневого информационного комплекса включает в себя помимо традиционных космического и наземного сегментов также авиационный и дополнительный наземный сегменты. При этом авиационный сегмент может содержать как пилотируемые, так и беспилотные летательные аппараты различных типов, оснащенные необходимой целевой аппаратурой, а дополнительный наземный сегмент – спутниковую систему точного позиционирования. В качестве примера рассмотрен прогноз информационных возможностей такого комплекса при решении геодезических задач.

*Ключевые слова:* дистанционное зондирование Земли, Белорусский космический аппарат, Белорусская космическая система дистанционного зондирования Земли, космический сегмент, авиационный сегмент, наземный сегмент, многоуровневый информационный комплекс.

**S. A. Zolotoy, A. V. Kosilo, A. A. Stavrov, I. B. Strashko**

*Scientific and Engineering Republican Unitary Enterprise «Geoinformation Systems», Minsk, Belarus*

## **SOME WAYS OF IMPROVING OF BELARUSIAN SPACE SYSTEM OF EARTH REMOTE SENSING**

The article discusses the possibility of improving the characteristics of the Belarusian space system of Earth remote sensing resulting from the implementation of multilevel information-integrated structure. The statement of this problem is related to the limitations that are typical for the shooting of the Earth's surface from space, caused by both natural (insufficient viewability), and technical (inadequate recording equipment) factors. The proposed configuration of the multi-level information complex includes, besides the traditional space and ground segments, also an aviation segment and another supplementary ground measuring segment. And the aviation segment can contain both manned and unmanned aerial vehicles of different kinds, equipped with the necessary target equipment, and the supplementary ground segment – the system of accurate positioning. The main technical characteristics of the target devices that can be used to implement the complex are considered. As an example, the forecast of information capabilities of the complex for the solution of geodetic problems was considered: integration of such heterogeneous information resources at the stages of issue of the flight missions and complex data processing can significantly increase the likelihood of obtaining the necessary information for consumers.

*Keywords:* Earth remote sensing, Belarusian spacecraft, the Belarusian space system of Earth remote sensing, space segment, aviation segment, ground segment, multi-level information complex.

**Введение.** Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) – одно из важнейших и интенсивно развивающихся направлений космической деятельности. В настоящее время существенный объем информации о земной поверхности и локализованных на ней объектах получают благодаря регистрации их изображений в оптическом и микроволновом диапазонах спектра. Многолетний международный опыт практического использования результатов ДЗЗ позволяет предполагать, что с течением времени этот объем будет только увеличиваться, а совершенствование аппаратуры и методов получения космических данных обеспечит заметное расширение их информативности.

Активным участником данных процессов является Республика Беларусь: 22 июля 2012 г. успешно выведен на орбиту Белорусский космический аппарат (БКА), входящий в состав Белорусской космической системы дистанционного зондирования Земли (БКСДЗ). В ноябре-декабре 2013 г. после полного цикла летных испытаний БКА и БКСДЗ введены в эксплуатацию. Национальным оператором БКСДЗ определено Научно-инженерное республиканское унитарное предприятие (НИРУП) «Геоинформационные системы» НАН Беларуси.

На протяжении всего срока существования БКСДЗ растет число потребителей информации, получаемой с ее помощью. Например, в 2015 г. услугами БКСДЗ воспользовались 24 организации из 11 министерств и ведомств Республики Беларусь, а также значительное количество внешних потребителей. Вместе с увеличением числа пользователей развиваются геоинформационные технологии, базирующиеся на космических данных, повышаются качество и оперативность решений, принимаемых на их основе.

Однако практика взаимодействия НИРУП «Геоинформационные системы» с различными потребителями космической информации показала, что для оперативного решения практических задач данных ДЗЗ, получаемых с помощью БКА, не всегда достаточно. Особенно это характерно для ситуаций, связанных, например, с необходимостью проведения срочных масштабных наблюдений при закрытой мощным слоем облаков поверхности Земли. Среди других причин, нередко затрудняющих получение высококачественной информации, следует отметить низкую различимость из космоса изображений облаков и снежного покрова, недостаточное для ряда задач пространственное и спектральное разрешение целевой аппаратуры, невысокую периодичность получения информации и ее значительную стоимость.

Перспективным способом решения данных проблем может стать реализация многоуровневой структуры БКСДЗ, состоящей из традиционных космического и наземного, а также авиационного и дополнительного наземного сегментов.

Целью настоящей работы является обоснование целесообразности создания такой структуры на примере одной из наиболее востребованных практических задач – геодезических измерений, являющихся основой для топографо-картографического, кадастрового, природоохранного и других важных применений.

**Основные результаты.** Существующая БКСДЗ содержит два крупных взаимно интегрированных аппаратно-программных сегмента – космический и наземный. Первый из них представлен БКА с пространственными разрешениями 2,1 м (панхроматический канал) и 10,5 м (цветные каналы), обеспечивающими получение оптических изображений поверхности Земли в видимом и частично ближнем инфракрасном диапазонах спектра [1]. Наземный сегмент включает в себя средства управления спутником, получения, обработки, хранения и распространения космических данных. Кроме того, он обеспечивает согласованное функционирование БКА и российского космического аппарата (КА) «Канопус-В №1» [2] в составе российско-белорусской орбитальной группировки.

Развитие методов и средств ДЗЗ осуществляется, прежде всего, за счет создания специализированных КА. Данные, получаемые с помощью спутников ДЗЗ, условно можно классифицировать по пространственному разрешению (табл. 1) и спектральному диапазону (табл. 2).

В соответствии с данной классификацией развитие космического сегмента БКСДЗ на текущем этапе целесообразно осуществлять за счет создания нового отечественного КА ДЗЗ сверхвысокого (панхроматический канал) и высокого (цветные каналы) разрешений. В табл. 3 представлены некоторые важные рабочие характеристики эксплуатируемого образца БКА и разрабатываемого в настоящее время перспективного КА. Подобное совершенствование позволит существенно (более чем в 4 раза) повысить пространственное разрешение целевой аппаратуры, что положительно скажется на перечне и информационном уровне решаемых геодезических задач.

Предварительная проработка технических путей развития авиационного сегмента БКСДЗ осуществлена в 2015–2016 гг. в инициативном порядке НИРУП «Геоинформационные системы» совместно с предприятиями Министерства лесного хозяйства, Государственного комитета по имуществу, Государственного пограничного комитета. Изучались возможности комплексного

Т а б л и ц а 1. Пространственное разрешение КА ДЗЗ

Степень разрешения	Величина разрешения, м
Низкая	> 10
Средняя	2,5–10
Высокая	1–2,5
Сверхвысокая	< 1

**Т а б л и ц а 2. Спектральные диапазоны КА ДЗЗ**

Спектральный канал	Диапазон длин волн, мкм	Источник излучения	Измеряемая характеристика
Видимый	0,4–0,7	Солнце (пассивная система)	Отражательная способность
Ближний инфракрасный	0,7–1,1; 1,1–1,35; 1,4–1,8; 2,0–2,5	Солнце (пассивная система)	Отражательная способность
Средний инфракрасный	3–4; 4,5–5	Солнце (пассивная система); источники тепла (пассивная система)	Отражательная способность; температура
Дальний инфракрасный	8–9,5; 10–14	Источники тепла (пассивная система)	Температура
Микроволновый	> 1000	Источники тепла (пассивная система); собственное излучение (активная система)	Температура (пассивная система); рельеф местности (активная система)

**Т а б л и ц а 3. Рабочие характеристики БКА и перспективного КА ДЗЗ**

Параметр	БКА		Перспективный КА	
	Спектральный режим съемки			
	Панхроматический	Мультиспектральный	Панхроматический	Мультиспектральный
Рабочий диапазон длин волн, мкм	0,54–0,86	0,46–0,52 (синий); 0,51–0,60 (зеленый); 0,63–0,69 (красный); 0,75–0,84 (ближний ИК)	0,54–0,86	0,46–0,52 (синий); 0,51–0,60 (зеленый); 0,63–0,69 (красный); 0,75–0,84 (ближний ИК)
Пространственное разрешение, м	2,1	10,5	0,5	2,0
Ширина полосы съемки, км	23	20	18	23
Возможность получения стереопары	да (с разных витков)		да (на одном витке)	
Радиометрическое разрешение, бит	12		12	

использования данных ДЗЗ, получаемых с помощью штатной целевой аппаратуры БКА, а также фоторегистрирующих систем, устанавливаемых на пилотируемых и беспилотных авиационных носителях.

В табл. 4 представлены основные характеристики аэрофотосъемочного аппарата Leica ADS100 [3], обеспечивающего сверхвысокое пространственное разрешение с борта пилотируемого летательного аппарата (самолета, вертолета).

Более детальное, чем в случае пилотируемой авиации, пространственное разрешение (единицы сантиметров), а также предельно высокая оперативность съемки могут быть реализованы

**Т а б л и ц а 4. Характеристики целевой аппаратуры Leica ADS100 для пилотируемой авиации**

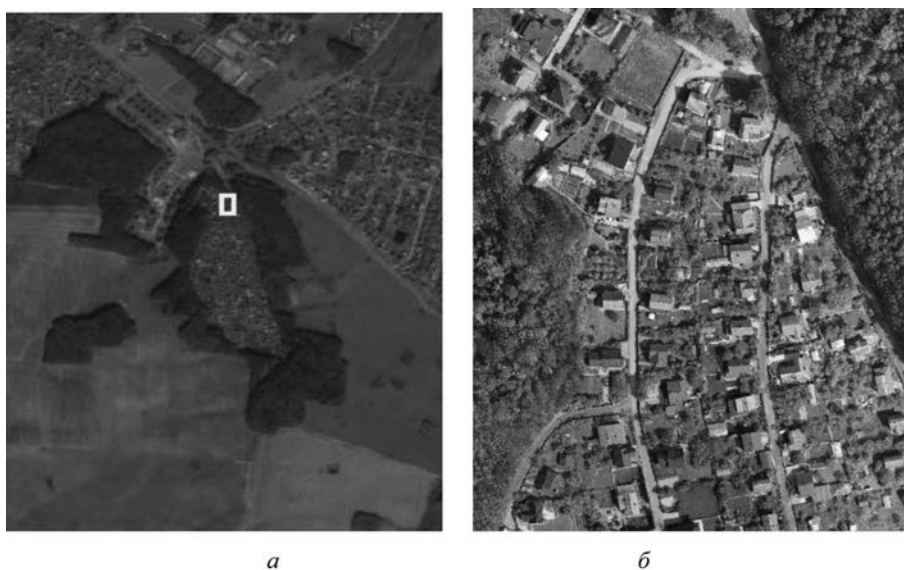
Параметр	Величина
Пространственное разрешение, м	> 0,04
Ширина полосы фотосъемки, м	≥ 800
Рабочие спектральные диапазоны, мкм	0,435–0,495 (синий) 0,525–0,585 (зеленый) 0,619–0,651 (красный) 0,808–0,882 (ближний ИК)
Радиометрическое разрешение, бит	12

при использовании в качестве носителей целевой аппаратуры беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) самолетного и вертолетного (мультироторного) типов [4]. Весьма перспективным является применение БПЛА белорусского производства [5], для которых возможно создание сверхлегких отечественных цифровых фоторегистраторов с варьируемыми в процессе полета или наземного обслуживания параметрами [6–8]. Экспериментальная отработка (включая лабораторные и полевые условия) основных модулей, обеспечивающих реализацию данного информационного уровня, осуществляется в НИРУП «Геоинформационные системы» в инициативном порядке со середины 2015 г.

На рисунке *а, б* в качестве примера представлены снимки поверхности Земли, зарегистрированные с помощью космического и авиационного беспилотного носителей целевой регистрирующей аппаратуры. Полученные изображения продемонстрировали высокую информативность и взаимную дополняемость, обеспечивающие существенное расширение перечня реализуемых геодезических форматов, прежде всего, мелкомасштабных с характерным для них высоким пространственным разрешением. Кроме того, высокая маневренность авиационных (пилотируемых и беспилотных) носителей по высоте, скорости и курсу позволяет варьировать параметры съемки в достаточно широких пределах, что заметно расширяет информационные возможности БКСДЗ в неблагоприятных для космической съемки условиях.

Для оптимизации информационных возможностей всех перечисленных сегментов усовершенствованной БКСДЗ, достижения при этом необходимых для геодезических измерений предельно высоких точностных характеристик может быть эффективно использована действующая в Республике Беларусь спутниковая система точного позиционирования (ССТП), покрывающая в настоящее время почти всю территорию страны [9]. Информация, выдаваемая ССТП, позволит существенно уточнить данные бортовых навигационных систем всех рассматриваемых информационных уровней. У НИРУП «Геоинформационные системы» имеется необходимый научно-технический задел в области создания подобных сложных аппаратно-программных средств.

В целом результаты натурных исследований и численных оценок показывают, что в интересах государства (для решения целевых задач министерств, ведомств, региональных органов управления) и коммерческих потребителей в качестве приоритетного направления развития БКСДЗ следует рассматривать создание авиакосмического многоуровневого информационного комплекса (МИК) ДЗЗ. При этом имеется возможность практически полного использования технических решений, реализованных в составе существующей БКСДЗ. В совокупности это обеспечит высокую оперативность и полноту решения большинства прикладных задач, повышение качества и снижение стоимости оказываемых услуг.



Снимок поверхности Земли, зарегистрированный целевой аппаратурой БКА (*а*), и его выделенный фрагмент, полученный с помощью БПЛА (*б*)

В условиях практической реализации МИК ДЗЗ следует выделять четыре базовых информационных уровня аэрокосмического мониторинга.

**Уровень 1 (данные ДЗЗ, получаемые из ресурсов существующей БКСДЗ).** Такие данные предоставляются в настоящее время БКА [1] и частично российским КА «Канопус-В № 1» [2]. Оба спутника имеют схожие характеристики, а получаемые с их помощью снимки соответствуют масштабам 1:25000 и мельче при обновлении тематических картографических материалов, а также 1:50000 и мельче при обновлении государственных топографических и навигационных карт.

Помимо названных КА Национальным оператором БКСДЗ предоставляются также свободно распространяемые данные с метеорологических спутников NOAA [10] и Terra [11] при возможности дальнейшего расширения их перечня. Такие сведения поступают регулярно и обеспечивают потребителей актуальной информацией как на территорию Республики Беларусь, так и на прилегающие территории. Информация с этих спутников интенсивно и результативно используется в повседневной деятельности Государственным учреждением «Республиканский центр управления и реагирования на чрезвычайные ситуации Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь» и Государственным учреждением «Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды» Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь.

Планируемые более высокие технические характеристики перспективного КА дадут возможность МИК ДЗЗ решать задачи, связанные с мониторингом объектов местности, по точности эквивалентные масштабу топографических карт не хуже 1:5000.

**Уровень 2 (данные ДЗЗ, получаемые с помощью аэрофотосъемочной аппаратуры, устанавливаемой на пилотируемых авиационных носителях).** Эти данные соответствуют картографическому масштабу до 1:1000 при использовании имеющейся аэрофотосъемочной аппаратуры Leica ADS100 [3]. Такая фотосъемка выполняется РСХАУП «БелПСХАГИ» Государственного комитета по имуществу Республики Беларусь в плановом порядке, а получаемая информация применяется в основном для создания (обновления) картографических основ государственных кадастровых систем: земельного кадастра, кадастра недвижимости, лесоустроительного кадастра и др. Главная задача на этом уровне – оптимальная интеграция получаемой информации (включая метаданные) в общую базу авиакосмических данных при обеспечении доступа к ней установленным порядком всем участникам проекта и другим заинтересованным потребителям.

**Уровень 3 (данные ДЗЗ, получаемые с помощью аппаратуры, размещаемой на беспилотных летательных аппаратах).** Современные БПЛА могут оснащаться малогабаритным аэрофотосъемочным оборудованием, а также средствами высокоточного позиционирования и управления полетом [6]. В качестве целевой аппаратуры используются новейшие фотографические и видеосъемочные устройства высокого разрешения, в том числе мультиспектральные [7], а также тепловизоры и датчики различных физических величин. В настоящее время в Республике Беларусь создан типоряд современных многофункциональных БПЛА взлетной массой от 8 до 200 кг [5], пригодных для размещения как существующей, так и вновь разрабатываемой специализированной фотосъемочной аппаратуры.

Данные, получаемые с помощью БПЛА, можно характеризовать как исключительно оперативные при сверхвысоком пространственном разрешении. Геодезическую фотосъемку целесообразно проводить на относительно небольших площадях либо применительно к узким протяженным объектам. Основные решаемые задачи – мониторинг местности и объектов в реальном масштабе времени и геоструктурирование территорий путем использования координат глобальных навигационных спутниковых систем (ГЛОНАСС/GPS/BeiDou/Galileo). Ортофотопланы, реализуемые по материалам таких съемок, соответствуют картографическому масштабу до 1:500.

**Уровень 4 (данные ДЗЗ, получаемые с применением спутниковой системы точного позиционирования).** При выполнении геодезических работ ССТП обеспечивает определение (уточнение) координат наземных объектов в реальном времени со средней квадратической погрешностью 2 см в плане и 3 см по высоте [10]. Система планомерно развивается: в настоящее время она содержит около 90 постоянно действующих пунктов, покрывающих примерно 85% площади страны.

В целом данные, предоставляемые МИК ДЗЗ, могут стать базовым источником информации при решении следующих геодезических задач (табл. 5).

Т а б л и ц а 5. Перечень геодезических задач, решаемых МИК ДЗЗ

Решаемая задача	Масштаб	Уровень 1	Уровень 2	Уровень 3
Создание и обновление топографических карт	1:10000	+	+	+
	1:25000	+	+	
	1:50000	+		
	1:100000	+		
Создание и обновление топографических планов населенных пунктов	1:500			+
	1:1000		+	+
	1:2000		+	+
	1:5000		+	+
	1:10000	+	+	+
	1:25000	+	+	
Земельный кадастр. <i>Инвентаризация земель районов. Создание и обновление плано-картографической основы землеустроительных карт и планов</i>	1:2000		+	+
	1:10000	+	+	+
	1:50000	+		
Градостроительный кадастр. <i>Инженерные изыскания. Создание и обновление плано-картографической основы планов детальной планировки, генеральных планов населенных пунктов, территориального планирования</i>	1:500			+
	1:2000		+	+
	1:5000		+	+
	1:10000	+	+	+
	1:50000	+		
Кадастр недвижимости. <i>Создание и обновление плано-картографической основы для кадастра недвижимости, адресного реестра</i>	1:2000		+	+
	1:10000	+	+	+
Лесоустроительный кадастр. <i>Создание и обновление лесоустроительных планов. Оперативный мониторинг лесов</i>	1:10000	+	+	+
	1:50000	+		
Создание и обновление картографической основы особо охраняемых природных территорий	1:10000	+	+	+
	1:50000	+		
Оперативный мониторинг паводкоопасных и пожароопасных территорий	1:50000	+		
	1:100000	+		
Экологический мониторинг суши, акваторий, выявление источников загрязнений окружающей среды	1:10000	+	+	+
	1:25000	+	+	
	1:50000	+		
	1:100000	+		
Моделирование чрезвычайных ситуаций	1:10000	+	+	+
	1:50000	+		
	1:100000	+		
	1:200000	+		

**Заключение.** Созданный к настоящему времени в НИРУП «Геоинформационные системы» научно-технический задел позволит реализовать все необходимые информационные уровни МИК ДЗЗ. Комплексное использование данных аэрокосмического мониторинга в рамках единой системы приведет к существенному расширению рынков сбыта получаемых геоинформационных продуктов. При этом требуется создание нормативно-правовой базы, регламентирующей взаимодействие всех уровней нового комплекса.

Обеспечение органов государственного управления единой геопространственной основой, реализуемой с помощью МИК ДЗЗ, исключит дублирование работ и обеспечит единый источник взаимно согласованной информации при подготовке управленческих решений. В сочетании с информацией космического сегмента (прежде всего, орбитальной группировки КА) МИК ДЗЗ обеспечит оперативную и высоко достоверную информацию о наблюдаемых объектах и явлении-

ях, что повысит качество решений, принимаемых на основе разнородных данных как на территории Республики Беларусь, так и за ее пределами.

Для снижения затрат на разработку и повышения качества предоставляемых услуг целесообразно установить государственное регулирование процессов получения и использования данных МИК ДЗЗ. Комплекс должен быть не конкурирующим, а взаимно интегрированным с существующими ведомственными информационными системами. Это позволит дополнить и существенно расширить его функционально-информационные возможности. Кроме того, появится возможность предоставлять услуги электронного доступа к геопространственной информации МИК ДЗЗ заинтересованным органам государственного и местного управления, юридическим и физическим лицам посредством сети Интернет с использованием геоинформационных технологий, а также обеспечивать субъекты хозяйствования едиными геопространственными данными при создании и обновлении планово-картографических материалов и ведении различных кадастровых систем с учетом действующего законодательства Республики Беларусь.

### Список использованных источников

1. Белорусский космический аппарат (БКА) [Электронный ресурс] // Научный центр оперативного мониторинга Земли. – Режим доступа: <http://gis.by/ru/tech/bka>. – Дата доступа: 25.05.2016.
2. Канопус-В [Электронный ресурс] // Википедия. – Режим доступа: <http://ru.cyclopaedia.net/wiki/Канопус-В>. – Дата доступа: 26.05.2016.
3. Зинченко, О. Н. Цифровые камеры для топографической аэрофотосъемки [Электронный ресурс] / О. Н. Зинченко / Ракурс: программные решения в области геоинформатики, цифровой фотограмметрии и дистанционного зондирования Земли. – Режим доступа: <http://www.racurs.ru/?pa-ge=784>. – Дата доступа: 24.05.2016.
4. Зинченко, О. Н. Беспилотный летательный аппарат: применение в целях аэрофотосъемки для картографирования [Электронный ресурс] / О. Н. Зинченко / Ракурс: программные решения в области геоинформатики, цифровой фотограмметрии и дистанционного зондирования Земли. – Режим доступа: <http://www.racurs.ru/?page=681>. – Дата доступа: 24.05.2016.
5. Список беспилотных летательных аппаратов [Электронный ресурс] // Википедия. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/>. – Дата доступа: 26.05.2016.
6. Мультиспектральная камера Tetracam Mini-MCA 6 для беспилотника Суперкам [Электронный ресурс] // Съемка с воздуха. – Режим доступа: <http://съемкасвоздуха.рф/bespilotniki-bpla/poleznaya-nagruzka/tetracam-mini-mca-6.html>. – Дата доступа: 26.05.2016.
7. Multispectral Camera [Electronic resource] // Leptron Unmanned Aircraft Systems, Inc. – Mode of access: [http://www.leptron.com/pdf/rededge\\_camera.pdf](http://www.leptron.com/pdf/rededge_camera.pdf) – Date of access: 25.05.2016.
8. Parrot Sequoia [Electronic resource] // AIRINOV. – Mode of access: <http://www.airinov.fr/en/uav-sensor/parrot-sequoia/> – Date of access: 26.05.2016.
9. Услуги точного позиционирования [Электронный ресурс] // УП «Белазрокосмогеодезия». – Режим доступа: <http://geo.by/ru/for-organizations/precise-positioning-service>. – Дата доступа: 26.05.2016.
10. NOAA, Satellite Missions [Electronic resource] // Satellite and information service, National Oceanic and Atmospheric Administration. – Mode of access: [http://www.nesdis.noaa.gov/about\\_satellites.html](http://www.nesdis.noaa.gov/about_satellites.html). – Date of access: 26.05.2016.
11. Terra [Electronic resource] // NASA. – Mode of access: [http://www.nasa.gov/mission\\_pages/terra/spacecraft/index.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/terra/spacecraft/index.html). – Date of access: 26.05.2016.

### References

1. Nauchnyi tsentr operativnogo monitoringa Zemli [Research Center for Earth Operative Monitoring], "Belarusian spacecraft (BKA)", Available at: <http://gis.by/ru/tech/bka>, (Accessed 25.05.2016).
2. Wikipedia, "Kanopus-V", Available at: <http://ru.cyclopaedia.net/wiki/Канопус-В>, (Accessed 26.05.2016).
3. Zinchenko, O.N. *Rakurs: programmnye resheniya v oblasti geoinformatiki, tsifrovoyi fotogrammetrii i distantsionnogo zondirovaniya Zemli* [Perspective: software solutions in the field of geoinformatics, digital photogrammetry and remote sensing], "Digital cameras for aerial topographic", Available at: <http://www.racurs.ru/?pa-ge=784>, (Accessed 24.05.2016).
4. Zinchenko, O.N. *Rakurs: programmnye resheniya v oblasti geoinformatiki, tsifrovoyi fotogrammetrii i distantsionnogo zondirovaniya Zemli* [Perspective: software solutions in the field of geoinformatics, digital photogrammetry and remote sensing], "UAV: the application for the purpose of aerial photography for mapping", Available at: <http://www.racurs.ru/?page=681>, (Accessed 24.05.2016).
5. Wikipedia, "List of unmanned aerial vehicles", Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/>, (Accessed 26.05.2016).
6. S'emka s vozdukhа, "Multispectral Camera Tetracam Mini-MCA 6 for drone Superkam", Available at: <http://съемкасвоздуха.рф/bespilotniki-bpla/poleznaya-nagruzka/tetracam-mini-mca-6.html>, (Accessed 26.05.2016).
7. Leptron Unmanned Aircraft Systems, Inc, "Multispectral Camera", Available at: [http://www.leptron.com/pdf/rededge\\_camera.pdf](http://www.leptron.com/pdf/rededge_camera.pdf), (Accessed 25.05.2016).

8. AIRINOV, "Parrot Sequoia", Available at: <http://www.airinov.fr/en/uav-sensor/parrot-sequoia/>, (Accessed 26.05.2016).
9. UP "Belaerokosmogeodeziya" [UE «Belaerokosmogeodeziya»], "Precise positioning service", Available at: <http://geo.by/ru/for-organizations/precise-positioning-service>, (Accessed 26.05.2016).
10. Satellite and information service, National Oceanic and Atmospheric Administration, "NOAA, Satellite Missions", Available at: [http://www.nesdis.noaa.gov/about\\_satellites.html](http://www.nesdis.noaa.gov/about_satellites.html), (Accessed 26.05.2016).
11. NASA, "Terra", Available at: [http://www.nasa.gov/mission\\_pages/terra/spacecraft/index.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/terra/spacecraft/index.html), (Accessed 26.05.2016).

### Информация об авторах

*Золотой Сергей Анатольевич* – кандидат технических наук, директор. Научно-инженерное республиканское унитарное предприятие «Геоинформационные системы» Национальной академии наук Беларуси (220012, г. Минск, ул. Сурганова, 6, Беларусь). E-mail: [gis@gis.by](mailto:gis@gis.by)

*Косило Андрей Владимирович* – начальник отдела автоматизированных картографических систем. Научно-инженерное республиканское унитарное предприятие «Геоинформационные системы» Национальной академии наук Беларуси (220012, г. Минск, ул. Сурганова, 6, Беларусь). E-mail: [andrei.kosilo@gmail.com](mailto:andrei.kosilo@gmail.com)

*Ставров Александр Афанасьевич* – доктор физико-математических наук, профессор, ученый секретарь. Научно-инженерное республиканское унитарное предприятие «Геоинформационные системы» Национальной академии наук Беларуси (220012, г. Минск, ул. Сурганова, 6, Беларусь). E-mail: [a.stavrov@mail.ru](mailto:a.stavrov@mail.ru)

*Страшко Игорь Болеславович* – заместитель директора по производству. Научно-инженерное республиканское унитарное предприятие «Геоинформационные системы» Национальной академии наук Беларуси (220012, г. Минск, ул. Сурганова, 6, Беларусь). E-mail: [igor.strashko@gmail.com](mailto:igor.strashko@gmail.com)

### Для цитирования

Некоторые пути совершенствования Белорусской космической системы дистанционного зондирования Земли / С. А. Золотой [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2016. – № 4. – С. 113–120.

### Information about the authors

*Zolotoy Sergey Anatolievich* – Ph. D. (Engineering), Director. Scientific and Engineering Republican Unitary Enterprise «Geoinformation systems» of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Surganova str, 220012, Minsk, Belarus). E-mail: [gis@gis.by](mailto:gis@gis.by)

*Kosilo Andrey Vladimirovich* – Head of Department. Scientific and Engineering Republican Unitary Enterprise «Geoinformation systems» of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Surganova str, 220012, Minsk, Belarus). E-mail: [andrei.kosilo@gmail.com](mailto:andrei.kosilo@gmail.com)

*Stavrov Aleksandr Afanasievich* – D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Scientific Secretary. Scientific and Engineering Republican Unitary Enterprise «Geoinformation systems» of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Surganova str, 220012, Minsk, Belarus). E-mail: [a.stavrov@mail.ru](mailto:a.stavrov@mail.ru)

*Strashko Igor Boleslavovich* – Deputy Director for Production. Scientific and Engineering Republican Unitary Enterprise «Geoinformation systems» of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Surganova str, 220012, Minsk, Belarus). E-mail: [igor.strashko@gmail.com](mailto:igor.strashko@gmail.com)

### For citation

Zolotoy S. A., Kosilo A. V., Stavrov A. A., Strashko I. B. Some ways of improving of Belarusian space system of Earth remote sensing. Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, physical-technical series. 2016. no. 4, pp. 113–120.



ISSN 0321-1649 (print)

**ДИАГНОСТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ  
И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ**  
*DIAGNOSTICS AND SAFETY OF TECHNICAL AND ENVIRONMENT SYSTEMS*

УДК 338.27

Поступила в редакцию 25.07.2016  
Received 25.07.2016

**А. А. Чурсин<sup>1</sup>, Ю. Н. Макаров<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>*Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация,*  
<sup>2</sup>*ГК «Роскосмос», Москва, Российская Федерация*

**АНАЛИЗ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ РЫНКА КОСМИЧЕСКИХ УСЛУГ**

В настоящее время уровень развития космической промышленности задает важнейшие макроэкономические показатели развития в стране, в том числе влияет на значение и темпы роста валового внутреннего продукта, определяет конкурентоспособность выпускаемой промышленной продукции и в целом национальной экономики. В статье определены основные области применения результатов космической деятельности, в том числе в гражданской сфере, проведен анализ современного состояния и перспектив развития мирового рынка космических услуг, направленных на удовлетворение потребностей населения. Для оценки развития техники и технологий в области космической деятельности авторами разработана математическая модель оценки и прогнозирования емкости рынка при выявленных тенденциях снижения стоимости космических услуг в мире. Построен прогноз изменения объема покупок и емкости рынка космических услуг до 2026 г.

*Ключевые слова:* конкурентоспособность продукции, космическая промышленность, национальная экономика, мировой рынок, космические услуги, прогноз емкости рынка.

**A. A. Chursin<sup>1</sup>, Yu. Makarov<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>*RUDN University, Moscow, Russian Federation,*  
<sup>2</sup>*State Space Corporation "Roscosmos", Moscow, Russian Federation*

**ANALYSIS AND FORECASTING OF SPACE SERVICE MARKET DEVELOPMENT**

Currently space industry development sets key macro-economic indicators in the country. It influences on such indicators as value and growth rates of GDP, improves competitiveness of industrial products and whole economies. The paper contains information about main areas of using space activity results in military and civilian spheres, the analysis of the current conditions and prospects of development of the world market of space services aimed at meeting peoples' needs. The authors create a mathematical model for estimating and predicting market capacity given actual trends of reducing space service cost in the world in order to assess development of equipment and technologies in the field of space activities. The paper contains the forecast of changes in the volume of purchases and capacity of space service market until 2026.

*Keywords:* product competitiveness, aerospace industry, national economy, world market, space services, market capacity forecast.

**Введение.** Развитие космической деятельности и ракетно-космической промышленности вносит существенный вклад в процессы глобализации мировой экономики, а коммерциализация результатов космической деятельности, особенно в последние 20–30 лет, способствует активному формированию мирового рынка космической продукции и услуг.

Космическая деятельность – это ведущая высокотехнологичная отрасль экономики, тесно взаимосвязанная с развитием таких отраслей промышленности, как машиностроение, приборо-



Рис. 1. Области использования результатов космической деятельности

строение, топливно-энергетический комплекс, транспортный, строительный, нефтехимический комплексы и др. В большинстве развитых стран мира уровень развития космической промышленности задает важнейшие макроэкономические показатели, в том числе влияет на значение и темпы роста валового внутреннего продукта, определяет конкурентоспособность выпускаемой промышленной продукции и в целом национальной экономики.

К основным направлениям космической деятельности в современной экономике можно отнести: научные космические исследования; использование космической техники для связи, телевизионного и радиовещания; дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) (эти данные необходимы как для мониторинга поверхности планеты, так и для метеонаблюдений); спутниковая навигация; применение космической техники, технологий и материалов для обеспечения национальной безопасности страны; пилотируемые полеты в космос; наблюдение за объектами и явлениями в космическом пространстве; производство в космосе материалов и иной продукции; другие виды деятельности, осуществляемые с помощью космической техники [1]. На рис. 1 показаны области применения результатов космической деятельности.

Организация экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) рассматривает космическую деятельность, прежде всего, с точки зрения хозяйственной составляющей как космическую экономику. Она включает всех государственных и частных участников, разрабатывающих и предоставляющих продукты и услуги, ставшие возможными благодаря космосу, начиная с НИОКР, производства космических средств и заканчивая поставкой конечным пользователям продукции, включающей космическую компоненту (навигационное оборудование и спутниковые телефоны), и услуг (услуги ДЗЗ, спутниковая метеослужба, телевизионное вещание и др.).

**Рынок навигационных космических услуг.** Навигационные спутниковые системы необходимы для определения местоположения объекта, скорости движения и точного времени воздушных, морских, сухопутных и других видов потребителей.

Навигационная отрасль формируется на стыке нескольких высокотехнологичных сегментов, таких как мобильная связь, автомобилестроение, микроэлектроника, информационные технологии, картография, геоинформатика, которые в свою очередь претерпевают глубокие и быстрые изменения (рис. 2).

В настоящее время стремительно развивается рынок глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) – рынок услуг и товаров, которые используют навигацию, определение местоположения на базе технологии ГНСС [2]. На рис. 3 приведен график, показывающий рост данного рынка в части целевого рынка (включает в себя только часть розничной стоимости товаров и дохода от услуг, которые напрямую имеют отношение к ГНСС) и рынка применения ГНСС



Рис. 2. Глобальный навигационно-информационный рынок и смежные высокотехнологические отрасли

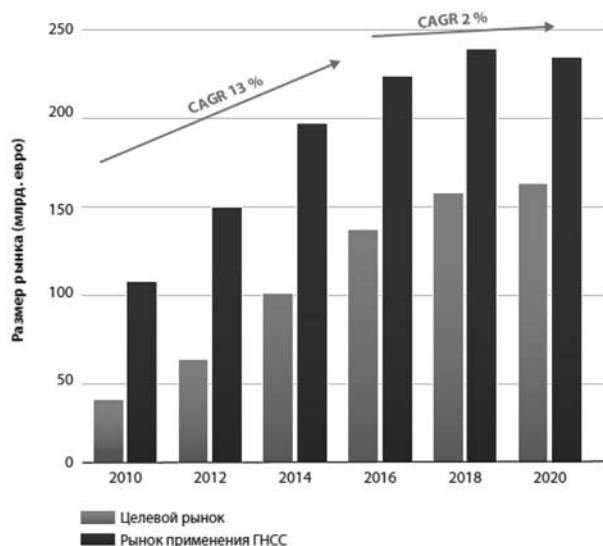


Рис. 3. Размер глобального рынка ГНСС (миллиарды евро).

(включает в себя целевой рынок и полную розничную стоимость всех устройств, использующих данную технологию). Прогнозируется, что среднегодовой темп роста общего дохода рынка применения до 2020 года составит 13%, далее после насыщения рынка рост стабилизируется.

**Рынок услуг дистанционного зондирования Земли.** Одной из сложных высокотехнологичных задач, одновременно представляющих один из наиболее перспективных и быстроразвивающихся видов бизнеса в коммерческой космической деятельности, является ДЗЗ (рис. 4), имеющее большое и уникальное прикладное значение для многих отраслей хозяйственной деятельности [3, 4]. Например, данные, полученные с помощью спутникового мониторинга, могут быть использованы при крупных природных и техногенных чрезвычайных ситуациях (весеннее половодье, лесные пожары, промышленные аварии и т. п.), для оценки их масштаба и нанесенного ущерба, для наблюдения за состоянием морских акваторий, навигационной обстановкой на дорогах, морях, ледовой обстановкой (оптимизация организации движения ледоколов), за динамикой изменения береговых линий, а также для изучения и картографирования городских территорий [5, 6], изучения функционирования различных экосистем, мониторинга разливов нефти (в настоящее время успешно работают программы радиолокационного мониторинга транспортировки и добычи нефти, использующие спутники, такие как RADARSAT-1/2, Cosmo-SkyMed,

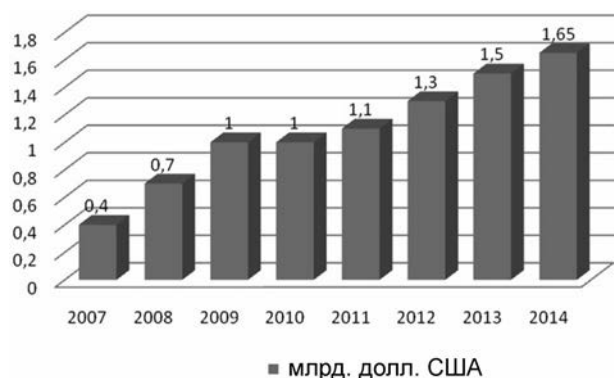


Рис. 4. Объемы мирового рынка ДЗЗ

ENVISAT, которые позволяют отслеживать нефтяные пятна на поверхности моря в любую погоду) [7], создания карт поверхностных течений вне зависимости от погодных условий с помощью метода спутниковой альтиметрии (изменения относительно поверхности Земли высоты спутника по времени прохождения посылаемого и получаемого сигнала, отражаемого от земной поверхности) и т. п. [4].

По прогнозам развития мирового рынка компании Euroconsult в среднем каждый год в ближайшие 10 лет будут запускаться 115 спутников, выполняющих задачи ДЗЗ. Их запуск

и модернизация существующих аппаратов обойдутся в 236 млрд. долл. США.

Как видно, данный рынок активно развивается. Ожидается, что к 2020 г. рынок производства космической техники ДЗЗ вырастет на 27% по сравнению с предыдущим десятилетием.

Основными потребителями данных ДЗЗ являются оборонные ведомства, занимающие 65% от общего объема продаж (по данным Euroconsult доход от поставок коммерческих данных ДЗЗ оборонным ведомствам может достигнуть к 2022 г. 2,2 млрд. долл. США). Крупнейшими операторами являются компании GeoEye, Digital Globe (США) и Astrium Geo-Information Services (ЕС).

В настоящее время ситуация на мировом рынке космических услуг ДЗЗ недостаточно стабильна. Это объясняется следующими фактами: низкое удовлетворение заявок при общем высоком уровне последних; происходящие изменения на мировом рынке, имеющие принципиальный, качественный характер, заключающийся в резком повышении конкурентной борьбы, возникновении множества негосударственных фирм и организаций, разрабатывающих новые технологии ДЗ для получения изображений высокого разрешения. Одновременно растут количество космических услуг и также их объем применения по странам мира (активной космической деятельностью занимается свыше 60 стран). Традиционными лидерами рынка космических услуг являются США, ЕС, Россия. Активно развивается данная сфера в Китае, Индии, Японии, Иране. Если 10–20 лет назад такие страны, как Индонезия, Кения, Малайзия, Мексика, Нигерия, Пакистан, Саудовская Аравия, Сингапур, Тайвань, Таиланд, Турция, ОАЭ, Венесуэла, Вьетнам и другие, практически не осуществляли космическую деятельность, то в настоящее время они превратились в соперников лидеров рынка космических услуг [1].

Республика Беларусь также активно развивает космическую деятельность. Белорусский спутник дистанционного зондирования Земли (БКА) запущен в 2012 г. В 2016 г. выведен на орбиту второй белорусский спутник (спутник связи) – Belintersat-1.

Динамика роста числа стран, пользующихся результатами космической деятельности, производящих ракетно-космическую технику и предоставляющих космические услуги, показана на рис. 5.

Следует отметить, что развивающиеся страны в космической деятельности главным образом делают акцент на решение экономических задач. Они позиционируются скорее как страны-потребители космических услуг (т. е. являются субъектами спроса на мировом рынке космической деятельности) и развивают больше прикладные космические средства, такие как системы связи и телекоммуникации, предоставленные лидирующими в космической деятельности странами.

По оценкам специалистов, ежегодный рост объема продаж продукции и услуг ДЗЗ будет составлять примерно 15–20%.

Расширение рынка космических услуг, а также рост конкуренции на нем обусловили снижение стоимости космических услуг. Если например, говорить о цене снимка поверхности Земли в 1 км<sup>2</sup>, полученного из космоса для решения экологических задач, то она составляет 8–10 долл., для сравнения – по российским ценам на эти деньги можно купить 15–20 л бензина (на 150–200 км пути) или 16–20 м<sup>3</sup> холодной воды (среднемесячный расход воды на семью из четырех человек). Как видно из этих цифр, стоимость снимков, являющихся, по сути, одним из ключевых элемен-



Рис. 5. Изменение структуры спроса и предложения на мировом рынке космической деятельности

тов предоставления космических услуг, приближается к стоимости обычных, повседневных услуг. По прошествии нескольких лет и их стоимость будет еще ниже и более сопоставима с привычными нам услугами. Сегодня мы не замечаем, как в нашу жизнь вошло спутниковое телевидение, Интернет, навигация. Через 1–2 года этот набор потребительских услуг расширится в разы, а стоимость, напротив, будет сокращаться, при этом эффект от развития космических услуг будет колоссальным для экономики страны и общества [5, 6].

**Модель оценки и прогнозирования емкости рынка космических услуг.** Для описания темпов развития техники и технологий предлагается разработанная нами математическая модель оценки и прогнозирования емкости рынка при выявленных тенденциях снижения стоимости космических услуг в мире.

Будем рассматривать множество потенциальных рынков в различных странах, которое обозначим следующим образом

$$G_1, G_2, \dots, G_N.$$

Рынок каждой страны будем описывать следующими параметрами в фиксированный момент времени:  $A_n$  – объем покупок космических услуг,  $C_n$  – емкость рынка космических услуг,  $P_n$  – потенциал роста объема рынка космических услуг.

Объем покупок космических услуг описывает текущее состояние их рынка. Единицами измерения  $A_n$  являются финансовые единицы (доллары, рубли). Емкость рынка космических услуг  $C_n$  описывает его максимально возможное расширение, единицы измерения – финансовые единицы (доллары, рубли). Потенциал роста объема рынка космических услуг  $P_n$  описывает возможное увеличение объема рынка космических услуг в зависимости от его текущей емкости. Данный параметр является строго математически случайной величиной. Единицы измерения – проценты.

Опишем модель динамики объема покупок космических услуг на рынках стран, изолированных друг от друга. В начальный момент для каждого покупателя/потребителя космических услуг параметры объема покупок, емкости рынка и потенциала роста будем считать заданными. В последующий момент времени происходит пересчет этих параметров с учетом изменения внешних параметров, к которым относится, прежде всего, средневзвешенная цена предлагаемых космических услуг:

$$R_t, t = 1, 2, \dots,$$

где  $t$  – условное обозначение временного интервала, в рамках которого происходит изменение параметров покупателей.

Таким образом, в каждый момент времени происходит изменение параметров у покупателей космических услуг по следующему правилу:

$$\begin{aligned}A^{t+1} &= A^t + f(C^t, R^t), \\C^{t+1} &= C^t - g(A^{t+1}) + C^t P^t, \\P^{t+1} &= h(P^t, R^t).\end{aligned}$$

Здесь  $f, g, h$  – некоторые функции. Конкретный вид последних может быть выбран с учетом региональной специфики покупателей и складывающейся конъюнктуры рынков космических услуг. В общем виде эти функции могут быть представлены следующим образом:

$$\begin{aligned}f(C^t, R^t) &= k_1 \sqrt{C^t} \frac{k_2}{1 + k_3 R^t}, \\g(A^{t+1}) &= k_4 \sqrt{A^{t+1}}, \\h(P^t, R^t) &= P^t - k_5 \sqrt{R^t},\end{aligned}$$

где  $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5$  – некоторые положительные коэффициенты. Заметим, что мы не конкретизируем вид случайной величины  $P_n$ , а описываем лишь математическое ожидание.

Для проведения расчетов по данной математической модели необходимо производить последовательные вычисления с учетом прогнозирования стоимости космических услуг.

Поскольку наша модель ориентирована на рынки развивающихся стран, то следует учитывать, что они могут быть экономически и политически связанными. Ввиду этого предложенную модель можно обобщить, рассматривая не изолированные рынки потребления космических услуг, а связанные рынки. Таким образом, успешное предоставление отечественных космических услуг на рынке в одной из стран может позитивно повлиять на потенциал космических услуг на рынках в других странах.

Для описания модели связанных рынков необходимо составить граф зависимости отдельных рынков. Его вершинами будут собственно локальные рынки космических услуг, а ориентированные дуги будут показывать зависимость между этими рынками. Для проведения расчетов необходимо рассматривать нагруженный граф, где каждой ориентированной дуге приписан коэффициент влияния на потенциал. Этот коэффициент также будет меняться со временем. Введем обозначение для данного весового коэффициента:

$$Y_{ij}^{t+1} = k_6 \sqrt{A_i^t} C_j^t,$$

где  $i$  – номер вершины, из которой выходит дуга,  $j$  – номер вершины, в которую входит дуга.

С учетом данного коэффициента уравнение для динамики емкости рынков следует изменить следующим образом:

$$C^{t+1} = C^t - g(A^{t+1}) + C^t P^t + \sum Y^t.$$

Здесь суммирование проводится по всем входящим в  $n$ -ю вершину дугам.

**Результаты расчетов по модели оценки и прогнозирования емкости рынка космических услуг.** Предложенная модель позволяет проводить количественную оценку финансовой емкости

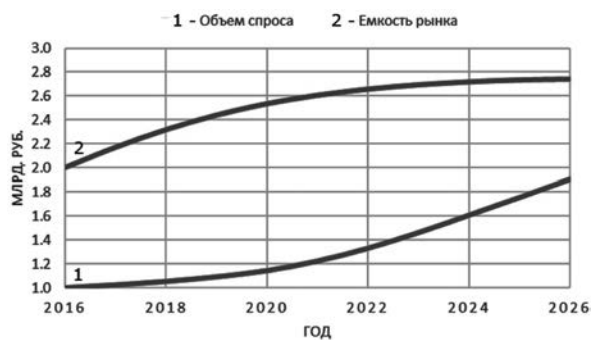


Рис. 6. Объем покупок и емкости рынка космических услуг

и объемов новых рынков космических услуг стран с развивающейся экономикой с учетом их экономических и политических связей в условиях снижающихся цен на космические услуги России.

Например, когда средневзвешенная оценка стоимости космической услуги уменьшается из года в год, кривые объема покупок и емкости рынка могут иметь вид, представленный на рис. 6. На основе данных рисунка можно говорить о том, что спрос на космические услуги в мире растет и на фоне этого научный потенциал

России в области распространения таких услуг уже в ближайшие годы может быть широко востребован на мировом рынке, поскольку она обладает широким спектром космических услуг, которые могут удовлетворить растущие потребности зарубежных государств в решении социальных задач.

**Заключение.** В настоящее время космические услуги позиционируются как один из наиболее перспективных, высокотехнологичных и наукоемких товаров мирового рынка, а также, что не менее важно, товаров с большим коммерческим потенциалом.

Результаты космической деятельности в части предоставления геоинформационных услуг снижают время принятия управленческих решений на 25–30%; повышают эффективность мониторинга водного, лесного хозяйства и земельных ресурсов на 25–30%; снижают стоимость работ по предотвращению и ликвидации аварий на 15–25%; повышают привлекательность региона для туристов на 10–15%.

Результаты ДЗЗ снижают затраты на разведку полезных ископаемых на 50–70%; увеличивают налоговые поступления за пользование природными ресурсами на 20–50%.

Высокоточная навигация позволяет повышать эффективность следующих видов работ:

геодезические работы (уменьшение сроков выполнения работ в 3 раза; снижение затрат в 8–10 раз);

учет земель и недвижимости (уменьшение сроков выполнения работ в 3 раза; увеличение поступления земельных платежей на 40–50%; снижение стоимости работ по инвентаризации земель и недвижимости на 20–30%);

создание объектов инфраструктуры (уменьшение сроков выполнения работ в 2 раза; снижение затрат на 30–40%; уменьшение объемов архитектурно-планировочных работ на 30%);

в реальном времени контроль состояния критически важных объектов (ГЭС, мостов, спортивных сооружений и др.);

мониторинг транспорта позволяет обеспечивать экономию топлива на 10–15%; повышать оборачиваемость рейсов на 20%; уменьшать потери от нецелевого использования транспорта на 25%, в 1,5 раза снижать количество дорожно-транспортных происшествий.

Среди результатов применения картографии 85–90% карт создается на основе космосъемки; в 6–8 раз снижаются финансовые затраты по сравнению с аэросъемкой; в десятки раз сокращаются сроки работ по сравнению с инженерной наземной съемкой.

Таким образом, решение социальных задач с помощью применения космических знаний и услуг не только открывает широкие возможности перед бизнесом, но и является залогом будущего динамичного развития стран мира.

#### Список использованных источников

1. Экономика космической деятельности: монография / под. науч. ред. д. т. н., проф. Г. Г. Райкунова / Г. И. Ванин [и др.]. – М.: Физматлит, 2013. – 600 с.
2. Борониллов А. Б. Организационно-экономические аспекты моделирования программы внедрения системы ГЛОНАСС в эксклавном регионе России / А. Б. Борониллов // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. – 2011 – № 3. – С. 132–136.
3. Новикова, Н. Н. Вопросы использования данных ДЗЗ для решения социально-экономических задач / Н. Н. Новикова // Вопросы электромеханики. – 2008. – Т. 105. – С. 58–62.
4. An economic value of remote-sensing information. Application to agricultural production and maintaining groundwater quality / W. M. Forney [et al.] / U.S.: Geological Survey Professional Paper, 2012, 60 p.
5. Monitoring Bedfast Ice and Ice Phenology in Lakes of the Lena River Delta Using TerraSAR-X Backscatter and Coherence Time Series / S. Antonova [et al.] / Remote Sens. – 2016. – N 8. – P. 903–904.
6. Combining remote sensing and economic analysis to support decisions that affect water productivity / P.J.G.J. Hellegers [et al.] / Irrig Sci, 2009. – N 27. – P. 243, doi:10.1007/s00271-008-0139-7.
7. Morgenstern, A., Grosse, G., Günther, F., Fedorova, I., Schirrmeister, L. Spatial analyses of thermokarst lakes and basins in Yedoma landscapes of the Lena Delta / A. Morgenstern et al / Cryosphere. – 2011. – N 5. – P. 849–867.
8. Садовничий, В. А., Козодеров, В. В., Ушакова, Л. А., Ушаков, С. А. Космическое землеведение: информационно-динамические исследования / В. А. Садовничий [и др.]. – М.: МГУ им. М. В. Ломоносова, 2011.
9. Чурсин, А. А. Повышение результативности экономической деятельности при применении космических услуг в отраслях народного хозяйства / А. А. Чурсин // Российские инновационные технологии и мировой рынок: Международный форум, 27 октября 2015 г. – М.: РУДН. – 2015. – С. 107–114.
10. Chursin, A., Makarov, Yu. Management of Competitiveness. Theory and Practice / A. Chursin, Yu. Makarov / – Springer, 2015. – 378 p. DOI 10.1007/978-3-319-16244-7.

## References

1. Vanyurikhin, G. I., Davydov, V. A., Kovkov, J. V. Makarov, Yu. N., Paison D. B., Raykunov G. G. and Chursin, A. A. (2013), *Ekonomika kosmicheskoi deyatel'nosti* [The Economy of space activities]: the monograph in Raikunov, G. G. (ed.), Fizmatlit, Moscow, RU.
2. Boronilov, A.B. (2011), "Organizational and economic aspects of simulating implementation programme for GLONASS in the exclave region of Russia", *Bulletin of Baltic Federal University named after I. Kant*, no. 3, pp. 132–136.
3. Novikova, N. N. (2008), "The issues of using remote sensing data for solving social and economic challenges", *Voprosy elektromekhaniki* [Problems of electromechanics], no. 105, pp. 58–62.
4. Forney, W.M., Raunikar, R.P., Bernknopf, R.L. and Mishra, S.K. (2012), *An economic value of remote-sensing information. Application to agricultural production and maintaining groundwater quality*, U.S. Geological Survey Professional Paper.
5. Antonova, S., Duguay, C.R., Käab, A., Heim, B., Langer, M., Westermann, S. and Boike, J. (2016), "Monitoring Bedfast Ice and Ice Phenology in Lakes of the Lena River Delta Using TerraSAR-X Backscatter and Coherence Time Series", *Remote Sens*, no. 8, pp. 903–904.
6. Hellegers, P.J.G.J., Soppe, R., Perry, C.J. and Bastiaanssen, W.G.M. (2009), "Combining remote sensing and economic analysis to support decisions that affect water productivity", *Irrigation Science*, no. 27, p. 243, doi:10.1007/s00271-008-0139-7.
7. Morgenstern, A., Grosse, G., Günther, F., Fedorova, I. and Schirrmeister, L. (2011), "Spatial analyses of thermokarst lakes and basins in Yedoma landscapes of the Lena Delta", *Cryosphere*, no. 5, pp. 849–867.
8. Sadovnichii, V. A., Kozoderov, V. V., Ushakova L. A. and Ushakov, S. A. (2011), *Space geography: informational and dynamic studies*, Lomonosov Moscow State University, Available at: <http://www.slideserve.com/sun/4034528>, (Accessed 26.05.2016).
9. Chursin, A. A. (2015), "Increasing efficiency of economic activities due to satellite services", *Russian innovative technologies and world markets: the international forum, October 27, 2015*, Publishing house of PFUR, Moscow, RU, pp. 107–114.
10. Chursin, A. and Makarov, Yu. (2015), *Management of competitiveness. Theory and practice*, Springer, Switzerland, DOI 10.1007/978-3-319-16244-7.

## Благодарности

Исследование подготовлено при финансовой поддержке Российского гуманитарного научного фонда, грант № 15-22-01017 «а(м)»: «Механизмы развития экономики ракетно-космической промышленности на основе научно-технической интеграции России и Республики Беларусь».

## Информация об авторах

Чурсин Александр Александрович – академик Академии военных наук РФ, доктор экономических наук, профессор. Директор Института космических технологий Российского университета дружбы народов (Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6). E-mail: achursin2008@yandex.ru

Макаров Юрий Николаевич – академик Российской академии космонавтики им. К. Э. Циолковского, доктор экономических наук, начальник управления стратегического планирования и целевых программ ГК «Роскосмос», заведующий кафедрой управления конкурентоспособностью аэрокосмических предприятий Института космических технологий Российского университета дружбы народов (Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6). E-mail: myn@roscosmos.ru

## Для цитирования

Чурсин, А. А. Анализ и прогнозирование развития рынка космических услуг / А. А. Чурсин, Ю. Н. Макаров // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2016. – № 4. – С. 121–128.

## Acknowledgments

This paper was financially supported by Russian Humanitarian Science Foundation on the grant No.15-22-01017 "a(m)": "The mechanisms of economic development of space industry on the basis of scientific and technical integration of Russia and Belarus".

## Information about the authors:

Chursin Alexander Alexandrovich – Academician of Russian Academy of Military Science, D. Sc. (Economics), Professor. Director of Institute of space technologies of RUDN University (6 Miklukho-Maklay str., 117198, Moscow, Russian Federation). E-mail: achursin2008@yandex.ru

Makarov Yuri Nikolaevich – Academician of Russian Academy of cosmonautics, named after K.E. Tsiolkovski, D. Sc. (Economics), Head of strategic planning and target programmes department of State Space Corporation "Roscosmos", head of Department of competitiveness management of aerospace companies of Institute of space technologies of RUDN University (6 Miklukho-Maklay str., 117198, Moscow, Russian Federation). E-mail: myn@roscosmos.ru

## For citation

Chursin A. A., Makarov Yu. N. Analysis and forecasting of space service market development. Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, physical-technical series. 2016, no. 4, pp. 121–128.