

ISSN 1728-3841

2017 № 4

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ



# ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ

2017 № 4

ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ

# ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ

№ 4 2017

**Учредитель журнала:**

ЗАО «Солигорский Институт проблем  
ресурсосбережения с Опытным  
производством»

**Научно-технический журнал**

Издается с декабря 1998 г.  
Выходит четыре раза в год

**Редакция:**

Главный редактор

**Щерба Владимир Яковлевич**

Технический редактор

**Барановский Анатолий Леонидович**

Заместитель главного редактора

**Прушак Виктор Яковлевич**

Ответственный секретарь

**Заяц Ирина Михайловна**

**Редакционная коллегия:**

Андрейко С.С. – доктор технических наук, проф.

Богданович П.Н. – доктор технических наук, проф.

Данилов В.А. – доктор технических наук, проф.

Журавков М.А. – доктор физ.-мат. наук, проф.

Зубов В.П. – доктор технических наук, проф.

Березовский Н.И. – доктор технических наук, проф.

Петровский Б.И. – доктор технических наук

Басинюк В.Л. – доктор технических наук

Бровка Г.П. – доктор технических наук, доцент

Губанов В.А. – доктор технических наук

Захаров Ю.Н. – доктор технических наук, проф.

Иванов В.П. – доктор технических наук, проф.

Оника С.Г. – доктор технических наук, проф.

Струк В.А. – доктор технических наук, проф.



**Адрес редакции:**

ул. Козлова, 69, 223710, г. Солигорск, Минская обл., Республика Беларусь

Тел.: (+375 174) 26 35 32, (+375 174) 28 21 07, факс: (+375 174) 26 28 37

E-mail: [onti@sipr.by](mailto:onti@sipr.by)

Журнал включен в перечень научных изданий РБ для опубликования результатов диссертационных исследований по научным направлениям: технические науки (геотехнология, материаловедение, машиностроение)  
Журнал включен в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)

© ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

---

---

Памяти Владимира Яковлевича Щербы .....	5
---	---

### **ГЕОТЕХНОЛОГИЯ**

<b>Гец А.К., Крук Ю.С., Остапук М.И., Омшарук А.С.</b> Компьютерное моделирование процесса динамического управления качеством руды на калийном руднике .....	7
<b>Прушак В.Я.</b> Повышение эффективности добычи и переработки горно-минерального сырья на основе инновационного развития .....	14
<b>Кофанов А.Е., Холковский Ю.Р.</b> Геоэкологические аспекты моделирования локального загрязнения приземного атмосферного воздуха отработавшими газами автотранспортных средств .....	20

### **МАШИНОСТРОЕНИЕ**

<b>Вайтехович П.Е.</b> Модель истирающего воздействия измельчаемого материала на лопасти ротора ударно-центробежной мельницы .....	34
<b>Пашкевич В.М.</b> Компьютерное управление сборкой гипоидных передач .....	40
<b>Павлечко В.Н.</b> О влиянии центробежной силы на работу радиальной турбины при вводе закрученного потока .....	51

### **МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

<b>Овчинников Е.В., Лиопо В.А., Эйсымонт Е.И., Рискулов А.А., Елкин А.И.</b> Особенности технологии получения тонкослойных покрытий на поверхности твердых тел .....	64
<b>Шевчук В.В., Островский Л.К., Поткина Т.Н., Войтенко А.И.</b> Изучение минерального состава фосфоритовых концентратов как сырья для кислотной переработки .....	73
<b>Давыдова О.В., Дробышевская Н.Е., Подденежный Е.Н., Бойко А.А., Павленок А.В., Шаповалов В.М.</b> Оптические композиты на основе ультрадисперсных порошков иттрий-алюминиевого граната, активированного ионами церия .....	82
Перечень статей, опубликованных в журнале «Горная механика и машиностроение» в 2017 году .....	93

На обложке: машина врубовая баровая МВБ-140Э.

На 1-й стр.: комбайн избирательного действия КИД-220М со стреловидным телескопическим исполнительным органом.

На 3-й стр.: комбайн избирательного действия КИД-220М2 со стреловидным телескопическим исполнительным органом с двойной поперечно-режущей коронкой.

Свидетельство о государственной регистрации СМИ № 1000 от 12.01.2010 г.

Подписные индексы: 74933 (для индивидуальных подписчиков), 749332 (для организаций)

---

---

Подписано в печать 07.12.2017 г.

Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бумага «Navigator», А4, 80 г/м<sup>2</sup>. Заказ 4163. Усл. печ. л. 11,44. Тираж 120 экз. Отпечатано Минским областным унитарным предприятием «Слуцкая укрупненная типография».

Ул. М. Богдановича, 7, 223610, г. Слуцк, Минская область, Республика Беларусь.

ЛП № 02330/0494181 от 03.04.2009 г.

# MINING MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE-BUILDING

№ 4 2017

---

---

**Founder of the Journal:**

JSC “Soligorsk Institute of Resources  
Saving Problems with Pilot Production”

**Scientific and Technical Journal**

Published since December, 1998  
Issued four times a year

**Edition:**

Editor-in-Chief

**Shcherba Vladimir Yakovlevich**

Technical Editor

**Baranovsky Anatoly Leonidovich**

Editor-in-Chief Deputy

**Prushak Viktor Yakovlevich**

Executive Secretary

**Zayats Irina Mikhailovna**

**Editorial Board:**

Andreiko S.S. – Ph.D., Professor  
Bogdanovich P.N. – Ph.D., Professor  
Danilov V.A. – Ph.D., Professor  
Zhuravkov M.A. – Ph.D., Professor  
Zubov V.P. – Ph.D., Professor  
Berezovsky N.I. – Ph.D., Professor  
Petrovsky B.I. – Ph.D.

Basinyuk V.L. – Ph.D.  
Brovka G.P. – Ph.D., Assist. Professor  
Gubanov V.A. – Ph.D.  
Zakharov Yu.N. – Ph.D., Professor  
Ivanov V.P. – Ph.D., Professor  
Onika S.G. – Ph.D., Professor  
Struk V.A. – Ph.D., Professor



**Editorial Address:**

Kozlova street 69, 223710, Soligorsk, Minsk region, Republic of Belarus  
Tel: (+375 174) 26 35 32, (+375 174) 28 21 07, Fax: (+375 174) 26 28 37  
E-mail: [onti@sipr.by](mailto:onti@sipr.by)

---

---

The journal is included in the list of scientific publications of the Republic of Belarus for publishing the results of dissertation studies on scientific directions: technical sciences (geotechnology, materials engineering, machine-building)  
The magazine is included in Russian Science Citation Index

© JSC “Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production”, 2017

## CONTENTS

---

---

<b>Devoted to the memory of Vladimir Yakovlevich Shcherba .....</b>	<b>5</b>
---	----------

### ***GEOTECHNOLOGY***

<b>Gets A.K., Kruk Yu.S., Ostapuk M.I., Omsharuk A.S.</b> Computer modelling of the process of dynamic quality management of potash ore at the mine .....	7
<b>Prushak V.Ya.</b> Improving the efficiency of mining and processing mining of mineral raw materials on the basis of innovative development .....	14
<b>Kofanov O., Kholkovskiy Yu.</b> Geoecological aspects of modeling of local pollution of surface atmospheric air by exhaust gases of motor vehicles .....	20

### ***MACHINE-BUILDING***

<b>Vaitekhovich P.E.</b> Model of grinding action of the material to be crushed on the rotor blades of the impact-centrifugal mill .....	34
<b>Pashkevich V.M.</b> Computer control of assembly of hypoid gears .....	40
<b>Pavlechko V.N.</b> Effect of centrifugal force on performance of the radial-flow turbine with swirling flow at the inlet .....	51

### ***MATERIALS ENGINEERING***

<b>Auchynnika Ya.V., Liopo V.A., Eisymont Ya.I., Riskulov A.A., Elkin A.I.</b> Features of the technology of thin-layer coatings on the surface of solid bodies .....	64
<b>Shevchuk V.V., Astrouski L.K., Potkina T.N., Vaitenka A.I.</b> The study of the phosphate concentrates mineralogical makeup for acid processing .....	73
<b>Davydova O.V., Drobyshevskaya N.E., Poddenezhny E.N, Boiko A.A., Pavlenok A.V., Shapovalov V.M.</b> Optical composites based on ultrafine powders of yttrium-aluminum garnet activated by cerium ions .....	82
A list of articles that have been published in the journal «Mining mechanical engineering and machine-building» in 2017.....	93

---

---

## ПАМЯТИ ВЛАДИМИРА ЯКОВЛЕВИЧА ЩЕРБЫ



С глубоким прискорбием сообщаем, что на 57-м году жизни скоропостижно скончался Владимир Яковлевич Щерба, главный редактор научно-технического журнала «Горная механика и машиностроение», профессор, доктор технических наук, член диссертационного совета при Белорусском национальном техническом университете, директор закрытого акционерного общества «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством».

Владимир Яковлевич окончил Белорусский институт механизации сельского хозяйства и Московский государственный открытый университет. С 1992 года работал в ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», с 1999 года – в должности директора. Подготовил и успешно защитил кандидатскую, а затем докторскую диссертации.

В.Я. Щерба являлся одним из ведущих организаторов горного машиностроения – новой отрасли промышленности в Беларуси, решающей актуальные проблемы импортозамещения и повышения экспортного потенциала отечественного машиностроения. При его активном участии разработаны и внедрены в производство различные виды высокопроизводительного горно-шахтного, обогащательного, экскаваторного и бурового оборудования, проходческо-очистных комбайнов, конвейеров, подъемных установок, погрузочно-разгрузочных и дробильно-сортировочных комплексов, шагающих землеройных машин и отвалообразователей и многое другое.

Владимиром Яковлевичем опубликовано более 350 научных работ, в том числе 10 монографий, получено 150 патентов на изобретения. Под его руководством 5 аспирантов получили ученые степени кандидатов технических наук.

Заслуги В.Я. Щербы отмечены государственными наградами. Он удостоен звания лауреата Государственной премии Республики Беларусь в области науки и техники за работу «Разработка и освоение производства подъемно-транспортного оборудования для горнодобывающей промышленности Республики Беларусь», награжден медалью «За трудовые заслуги», почетными грамотами Белорусского общества изобретателей и рационализаторов.

В.Я. Щерба проявлял себя как принципиальный, незаурядный организатор, требовательный и корректный по отношению к подчиненным. Творчески подходил к решению технических и научных задач, помогал реализовывать идеи коллег в научно-исследовательской и изобретательской деятельности. Обладал чувством меры и такта. Последовательно и неуклонно проводил политику по улучшению условий труда своих подчиненных, повышению их квалификации.

Коллеги, друзья, редакция журнала «Горная механика и машиностроение» глубоко скорбят в связи со смертью Владимира Яковлевича Щербы и выражают глубокое соболезнование его родным и близким. В памяти родных и близких, друзей и коллег Владимир Яковлевич останется не только прекрасным специалистом и руководителем, но и человеком высоких душевных и этических качеств.

*Редакция журнала «Горная механика  
и машиностроение»*

*Коллектив ЗАО «Солигорский Институт проблем  
ресурсосбережения с Опытным производством»*

**ГЕОТЕХНОЛОГИЯ**

УДК 622.363.2.013.3-021.465:004.94(045)(476)

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИНАМИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ РУДЫ НА КАЛИЙНОМ РУДНИКЕ**

Гец А.К., Крук Ю.С., Остапук М.И., Омшарук А.С. (Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь)

*В статье предложен один из методов динамической стабилизации качества руды, добываемой на калийных рудниках. Метод основан на математическом моделировании процессов добычи и транспортировки руды по системе конвейеров горизонта от забоев до стволов, с учетом ряда ограничений технологического и временного характера.*

Ключевые слова: *математическое моделирование, веб-приложение, качество руды, стабилизация качества.*

**Введение**

Стабилизация качества руды, поступающей с горизонтов рудника на обогательную фабрику, является одним из основных факторов, который необходимо учитывать при организации оперативного управления горными работами. Выбор этого критерия обосновывается тем, что расхождение в планируемых и фактических качественных характеристиках руды напрямую связано с рациональным использованием ресурсов горнодобывающего предприятия. Выполнение плана по объему горной массы на отдельном горизонте может быть обеспечено либо выполнением плана каждым из работающих забоев, либо перевыполнением плана некоторыми забоями для покрытия дефицита в руде на других. План для горизонта определяется не только суммарным объемом горной массы, но и качественными характеристиками добываемой руды.

Таким образом, возникает актуальная задача стабилизации качества руды на горнодобывающем предприятии, рассматриваемая ранее в [1, 2], с точки зрения минимизации расхождения планового и фактического качества добываемой руды при условии выполнения плана по объему добычи. Стратегия управления конвейерными линиями должна учитывать вариативность качества добываемой руды и регулировать процесс добычи с целью оптимизации использования ресурсов горнодобывающего предприятия.

Регулирование должно осуществляться на уровне управления горизонтом, определяемого его стратегией в целом, поскольку сложно, с точки зрения технической реализации, осуществить стабилизацию качества на одном участке – это определяется ограниченным количеством комбайнов, приблизительно одним качеством потока руды от каждого из них, различием в стадиях технологического цикла каждого забоя и т.д.

В рамках решения поставленной задачи реализовано компьютерное моделирование процесса добычи руды и ее транспортировки по конвейерным линиям горнодобывающего предприятия. Целью исследования является составление аналитического прогноза качества добытой руды на заданный период времени (час, смена, сутки), а в перспективе – определение вероятностной точности прогноза.

## 1. Поиск оптимального управления горнодобывающим комплексом для стабилизации качества добываемой руды

В рамках компьютерного моделирования рассматривается задача поиска оптимального режима функционирования добычных комплексов с точки зрения минимизации расхождения планового и получаемого качества руды в результате работы  $j$ -го количества забоев:

$$L(x) = \max |\alpha_{\phi_i} - \alpha_p| \rightarrow \min ,$$

где  $i = (1, 2, \dots, m)$  – число квантов времени управления в течение смены;

$j = (1, 2, \dots, n)$  – количество функционирующих добычных забоев;

$$\alpha_{\phi_i} = \frac{\sum_j \alpha_j Q_{ij} X_{ij}}{\sum_j Q_{ij}} \text{ – средневзвешенный показатель качества добываемой руды, по-}$$

ступающей к стволу горизонта;

$\alpha_p$  – показатель качества руды с горизонта, определяемый планом;

$\alpha_j$  – показатель качества руды из  $j$ -го забоя.

Ограничениями на параметры модели являются:

- необходимость выполнения забоями сменного плана по добыче руды;
- пропускные способности панельных конвейеров;
- пропускная способность магистрального конвейера.

Таким образом, ограничения имеют вид:

$$\begin{aligned} \sum_j Q_{ij} X_{ij} &\leq W_k^i; \\ \sum_j Q_{ij} X_{ij} &\leq W_u^i; \\ \sum_i Q_{ij} X_{ij} &\geq P_j, \end{aligned}$$

где  $k = (1, 2, \dots, l)$  – количество магистральных конвейеров на горизонте;

$u = 1, 2$  – количество стволов на горизонте;

$Q_{ij}$  – матрица возможностей забоев. Она определяет возможности по добыче руды  $j$ -м забоем в  $i$ -й период времени;

$W_k^i$  – пропускная способность  $k$ -го магистрального конвейера в  $i$ -й период времени;

$W_u^i$  – пропускная способность  $u$ -го ствола в  $i$ -й период времени;

$P_j$  – сменный план  $j$ -го забоя по добыче руды;

$X_{ij}$  – матрица-индикатор, определяющая, работает ли  $j$ -й конвейер в  $i$ -й промежуток времени:

$$X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } j\text{-й забой работает в } i\text{-й период времени;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Для решения поставленной задачи проводится компьютерное моделирование процесса стабилизации качества руды. На языке *Python* разработана программа, позволяющая осуществить выбор оптимальной стратегии управления.

В основу программы положены результаты математического моделирования из [1], в рамках которого оптимизационная задача решалась при помощи алгоритма направленного случайного поиска с самообучением. Основные этапы компьютерного моделирования приводятся на рисунке 1.



Рисунок 1. – Основные этапы компьютерного моделирования

Программа получает следующую входящую информацию:

- количество стволов на горизонте;
- количество магистральных конвейеров;
- количество квантов времени управления в течение смены;
- количество функционирующих забоев;
- плановые показатели качества добываемой руды;
- матрицу возможностей добычных забоев и пропускные способности конвейеров и стволов.

Комбинаторно, перебирая различные варианты включения в работу забоев, параллельно корректируя выполнение плана каждым из забоев, либо стараясь минимизировать невыполнение плана, программа позволяет получить и проанализировать список параметров, представленный в таблице 1.

Определяющим при выборе стратегии управления является значение матрицы-индикатора  $X = (x_{ij}), i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}$ , характеризующей активности конвейеров для каждого кванта времени. Отрицательные значения вектора невязок  $\Delta$  характеризуют выполнение плана соответствующим забоем.

Таблица 1. – Результаты моделирования

Параметр моделирования	Пример формата вывода параметров моделирования
Матрица-индикатор $X = (x_{ij}), i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}$	$X = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & \dots & 0 \end{bmatrix}$
Вектор-индикатор $\Delta = (\delta_j), j = \overline{1, n}$	$\Delta = [-0.5, -0.42, 0, -0.167]$
Вектор параметров качества руды $\alpha_{\varphi_i}, i = \overline{1, m}$ – средневзвешенная величина качества руды для каждого промежутка времени	$\alpha_{\varphi_i} = [3.741, 3.698, 3.654]$

Таким образом, результаты моделирования позволяют сделать вывод о выполнении/невыполнении плана каждым забоем при выборе конкретной стратегии управления. Заметим, что при выборе решения имеет смысл учитывать тот фактор, что включение комбайнов в работу связано с определенным графиком, регулирующим рабочие смены забоев. Поэтому было бы целесообразно из всех возможных решений выбирать то, которое в наибольшей степени соответствовало бы реальному рабочему графику. Следует отметить, что для каждой стратегии управления можно проанализировать средневзвешенные характеристики качества руды и выбрать стратегию (или стратегии), позволяющую решить задачу стабилизации качества руды, поступающей с горизонта на обогатительную фабрику. Запланировано усовершенствование разработанного алгоритма с точки зрения учета рабочего графика обслуживания конвейеров.

## 2. Разработка приложения в Oracle Apex для моделирования процесса добычи руды на калийном руднике

Одним из этапов компьютерного моделирования, направленного на решение поставленной задачи стабилизации качества руды, а также для решения задачи прогнозирования объемов добычи руды калийным рудником, является разработка приложения в *Oracle Apex*. Разработанное приложение хранит информацию о следующих сущностях-массивах (таблица 2).

Таблица 2. – Список базовых массивов приложения

№	Наименование массива	Таблица в приложении	Информация в таблице
1	2	3	4
1	список комбайнов	MOUNTAIN_ARRAY_OF_COMBINE	информация о комбайнах и их местоположении в руднике
2	массив табельный оперативный	MOUNTAIN_ARRAY_PERSONAL_OPERATING	информация о сотруднике и его специальности

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4
3	массив табельный нормативный	MOUNTAIN_ARRAY_PERSONAL_NORMAL	информация о местоположении и времени работы сотрудника
4	список лав	MOUNTAIN_NAME_OF_LAVA	информация о лавах, их длине и количестве слоев в лаве и др.
5	параметры качества руды	MOUNTAIN_PARAM_QUALITY_OF_ORA	информация о мощности пласта, содержании KCL и H <sub>2</sub> O для каждого слоя лавы
6	параметры моделирования	MOUNTAIN_ARRAY_PARAM_OF_MODELING	информация о расположении комбайнов в лавах, а также о параметрах операций, производимых комбайном
7	массив моделирования	MOUNTAIN_ARRAY_OF_MODELING	информация о типе и номере комбайна, информация о времени работы, номере операции и расстоянии от вентиляционного штрека на начало часа. Также массив моделирования хранит данные полученные в результате моделирования: номер операции и расстояние от вентиляционного штрека на конец часа, количество добытой руды за час
8	массив возможностей	MOUNTAIN_ARRAY OPPORTUNITIES	информация о прогнозе количества добытой руды
9	график переключения	MOUNTAIN_SWITH_ZAB	график переключения забоев

Рисунок 2 иллюстрирует взаимосвязи между созданными сущностями.

На рисунке 3 приводятся данные моделирования для прогнозирования количества добытой руды на заданный период.

На рисунке 4 проиллюстрирован график переключения забоев, который будет принимать данные, полученные в рамках решения задачи оптимизации для стабилизации качества добываемой руды, описанной в первом разделе настоящей статьи.

### Заключение

По результатам моделирования можно спрогнозировать объем добываемой руды для заданного промежутка времени, а также принять решение о выборе стратегии управления, минимизирующей расхождение планового и средневзвешенного качества руды. Вместе с тем возникает актуальная проблема выбора оптимального решения с практической точки зрения. В реальности из четырех квантов рабочего времени (смен в

течение суток) три являются последовательными периодами непосредственной работы, а четвертая смена является нерабочей (ремонтной).

В дальнейших исследованиях запланировано решение указанной проблемы и выработка поиска оптимальной стратегии управления, отвечающей не только условиям математической модели, но и ограничениям с практической точки зрения.

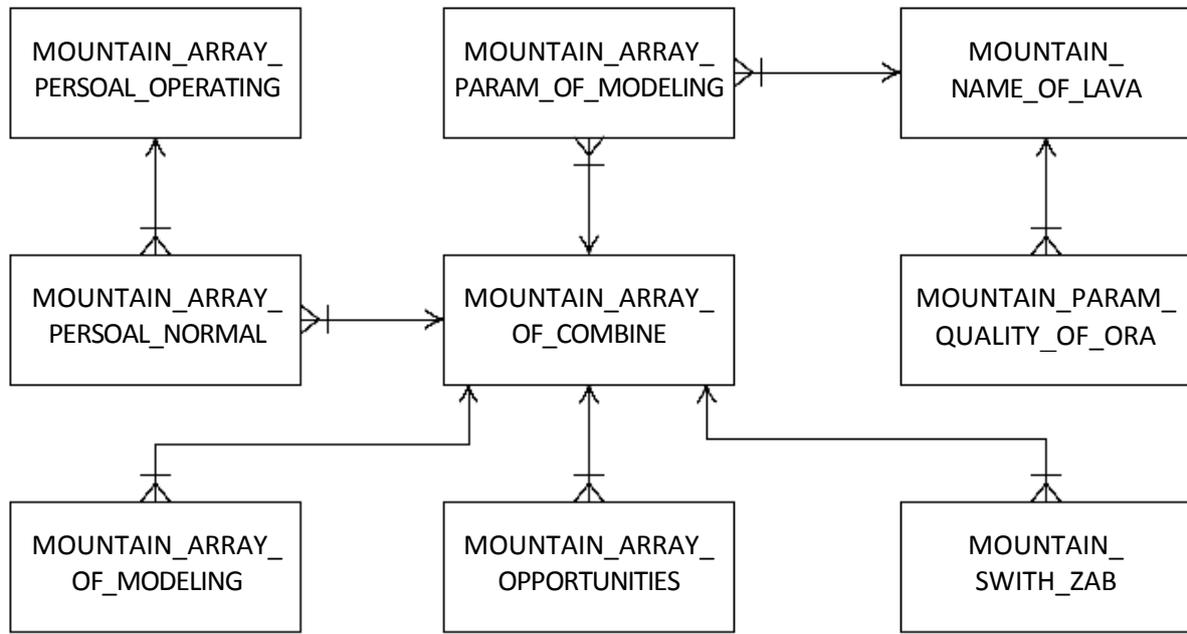


Рисунок 2. – Диаграмма, отображающая сущности и связи между ними

тип и номер комбайна	дата	номер смены	час смены	операция (начало часа)	расстояние (начало часа)	операция (конец часа)	расстояние (конец часа)	количество добытой руды (т)
SL-300 1	27-APR-17	1	1	2	196.2	1	7.8	88.8079
SL-300 1	27-APR-17	1	2	1	7.8	2	140.3	256.6274
SL-300 1	27-APR-17	1	3	2	140.3	3	127.4	189.1096
SL-300 1	27-APR-17	1	4	3	127.4	2	84.4	156.3257
SL-300 1	27-APR-17	1	5	2	84.4	2	234.4	250.047
SL-300 1	27-APR-17	1	6	2	234.4	2	28.5	67.6053

Рисунок 3. – Моделирование параметров и построение прогноза

дата смены	номер смены	тип и номер комбайна	первый час	второй час	третий час
26-APR-17	1	SL-300 1	0	0	0
26-APR-17	2	SL-300 1	1	1	1

Рисунок 4. – График переключения забоев

#### Список использованных источников

1. Гец, А.К. К вопросу управления качеством руды на калийном руднике / А.К. Гец, С.Г. Оника // Горная механика и машиностроение. – 2016. – № 1. – С. 27-30.
2. Гец, А.К. Организация оперативного управления горными работами в условиях калийного рудника п/о «Беларуськалий»: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 08.00.05 / А.К. Гец; Московский Горный институт. – М., 1978. – 18 с.

---

**Gets A.K., Kruk Yu.S., Ostapuk M.I., Omsharuk A.S.**

#### **Computer modelling of the process of dynamic quality management of potash ore at the mine**

*The article proposes one of the methods of dynamic stabilization of the quality of ore mined in potash mines. The method is based on mathematical modeling of ore mining and transportation processes along the horizon conveyor system from the mine face to the trunks, taking into account a number of technological and temporary limitations.*

*Keywords: mathematical modeling, web-application, ore quality, quality stabilization.*

Поступила в редакцию 23.10.2017 г.

УДК 622.36.013:001.895(045)(476)

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОБЫЧИ И ПЕРЕРАБОТКИ ГОРНО-МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ НА ОСНОВЕ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ**

Прушак В.Я. (ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», г. Солигорск, Беларусь)

*В статье анализируются проблемы инновационного развития отечественной горнодобывающей отрасли. Показана важность создания научно-производственного кластера горного машиностроения и горной технологии на базе научно-производственных и производственных предприятий Солигорского промышленного региона и профильных ведущих научных и проектно-конструкторских организаций страны. Анализируются новые перспективные технические и технологические решения в отечественной горной индустрии. Раскрывается внутренний и внешний потенциал белорусского горного машиностроения.*

*Ключевые слова: горное машиностроение, обогащение, месторождение, кластер, минеральное сырье, геотехнология, инновация.*

### **Введение**

Горно-минеральное сырье составляет около 65 % природных ресурсов страны, вовлекаемых в общественное потребление. Оно является исходным сырьем для получения товарной продукции в строительной, химической и других отраслях промышленности и служит источником более 50 % экспорта страны. Его потребление с каждым годом увеличивается. В тоже время постоянно ухудшаются условия выявления, разведки и формирования минеральных объектов добычи и переработки минерального сырья; сокращаются запасы относительно богатых полезных ископаемых и полезных минеральных веществ в целом; ухудшается качество минерального сырья и, в частности, значительно снижается содержание полезных компонентов в исходном минеральном сырье, а также увеличивается количество вредных примесей; ухудшаются горно-геологические и горнотехнические условия освоения месторождений полезных ископаемых; увеличиваются эксплуатационные и капитальные затраты на разведку, добычу и переработку минерального сырья. Высокими остаются экономические и социальные издержки минеральных, химических и горно-перерабатывающих производств. В условиях мировой рыночной экономики с возрастанием конкуренции на минеральных рынках все более жесткими становятся требования как к качеству самого минерального сырья, так и к получаемой из него продукции, и, соответственно, к технологическому оборудованию для его переработки.

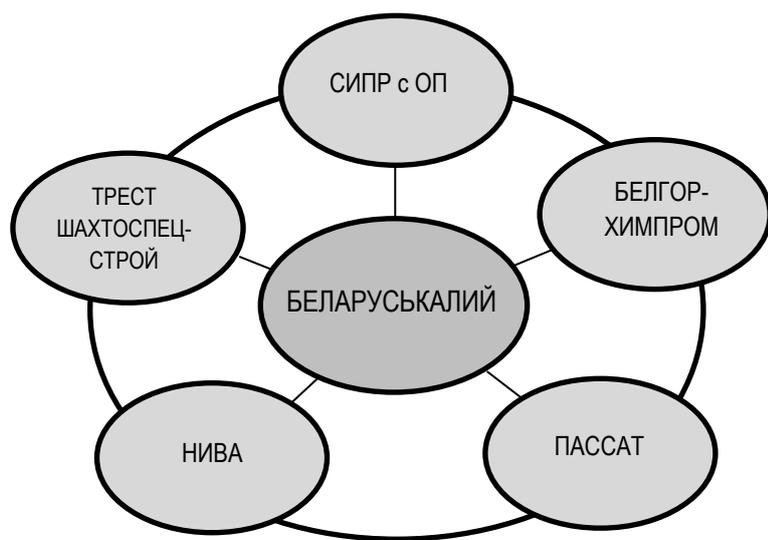
В связи с этим, проблема создания прорывных технологий в области геологоразведки, освоения месторождений и добычи полезных ископаемых, а также их переработки с обеспечением необходимого качества от исходного минерального сырья до готовой товарной продукции на основе, прежде всего, их эффективной подготовки приобретает все большую остроту.

### **Результаты исследования**

Решение проблемы повышения эффективности добычи и переработки горно-минерального сырья в настоящее время невозможно без глубоких научных, техниче-

ских и технологических исследований и обоснований подготовки минерального сырья на всех стадиях освоения месторождений полезных ископаемых и создания высококачественного технологического и научно-исследовательского оборудования.

Именно в этом направлении работает сегодня сформированный в Солигорском промышленном регионе научно-производственный кластер горного машиностроения и горной технологии, центральным производственно-технологическим ядром которого является ОАО «Беларуськалий» – одно из крупнейших в мире предприятий по производству калийных удобрений. Научно-производственный кластер образуют такие предприятия как научно-исследовательское и проектно-конструкторское Общество «Белгорхимпром», научно-производственное предприятие горного машиностроения и горной технологии ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», инжиниринговый и машиностроительный холдинг «Пассат», машиностроительный холдинг «Нива», предприятие по строительству объектов специального назначения «Трест Шахтоспецстрой». При этом структурно указанный научно-производственный кластер не ограничивается исключительно предприятиями Солигорского промышленного региона, но включает ряд других академических, научно-исследовательских и производственных предприятий Беларуси, которые в различной степени участвуют в работе кластера. В целом можно говорить, что в Солигорском промышленном регионе сформирован «Белорусский научно-производственный кластер горного машиностроения и горной технологии» (рисунок 1), который активно участвует



**Рисунок 1. – Структура Белорусского научно-производственного кластера горного машиностроения и горной технологии**

не только в освоении запасов Старобинского месторождения калийных солей, но также и других месторождений полезных ископаемых Беларуси. Кроме того, предприятия кластера с каждым годом все более активно участвуют в освоении калийных, угольных, нефтегазовых, сланцевых месторождений Российской Федерации (Урала, Сибири, Заполярья, Дальнего Востока), Туркменистана, Узбекистана, Эстонии и Румынии.

В последние годы учеными и инженерно-техническими работниками Белорусского научно-производственного кластера горного машиностроения и горной технологии раз-

работан комплекс мер по развитию рудной базы Старобинского месторождения калийных солей, запасы которого после длительной, почти шестидесятилетней его эксплуатации, заметно уменьшились и продолжают уменьшаться за счет наращивания добычи. Результатом такой работы явились строительство и ввод в эксплуатацию Пятого рудника, осуществляющего отработку калийной руды в сложных горно-геологических и горнотехнических условиях и снабжающего рудой обогатительную фабрику Второго рудоуправления, а также пуск Шестого рудника, поставляющего руду на фабрики Первого и Четвертого рудоуправлений. Развитие отечественной геотехнологии и горного

машиностроения позволили приступить к освоению, с использованием исключительно отечественных научно-технических ресурсов, Петриковского месторождения калийных солей, которое имеет более сложное горно-геологическое строение по сравнению со Старобинским месторождением.

При проектировании и строительстве этих объектов были применены самые передовые инновационные отечественные технологии. Например, впервые горной технологической выработкой пройден тектонический разлом земной коры. Построены современные конвейерные тракты, длиной 7,5 км и 12,5 км, подачи руды на обогащение. В целом, при строительстве и вводе в эксплуатацию новых рудников отечественными учеными и инженерами был выполнен огромный объем научно-исследовательской и проектно-конструкторской работы по обоснованию и выбору оптимальных схем раскройки и подготовки шахтных полей, обоснованию способов и систем разработки месторождения, совершенствованию технологии обогащения сырья с учетом изменения его характеристик [1, 2]. При этом почти все применяемое оборудование для возведения шахтных вертикальных стволов и комплектации рудников изготовлено на отечественных предприятиях.



**Рисунок 2. – Машина породопогрузочная стволовая МПС**

Например, для вскрытия новых месторождений разработаны и изготовлены оригинальные грейферные вертикально-проходческие и стационарные подъемные машины (рисунок 2).

Все шахтные грузовые и грузоподъемные подъемы оснащены отечественным оборудованием – шахтными проводниками, скипами, клетями, подвесными и уравновешивающими устройствами, копрами. Отработана система мониторинга и контроля безотказной работы шахтных подъемных установок. В том числе для угольных бассейнов Сибири разработан шахтный лифтовой подъемник реечно-канатной конструкции для «слепых стволов» – как резервный для вывода технологического персонала на поверхность при аварийной ситуации и возгорании угля.

Стабильность работы горных калийных предприятий и их перспективы в

значительной степени зависят от того, сумеют ли они удержать и укрепить свои позиции на внешнем рынке. Помимо развития сырьевой базы, что является необходимым, но недостаточным условием, при удовлетворении требований рынка по качеству и цене при ежегодном приросте производительности труда и снижении себестоимости продукции актуальными становятся ресурсосберегающие геотехнологии, позволяющие снизить эксплуатационные потери полезного ископаемого на всех технологических переделах и научно-обоснованные пространственно-компоновочные решения шахтных полей, позволяющие извлечь законсервированные запасы подрабатываемых калийных пластов (отработанных более 30 лет назад), а также краевых зон шахтных полей [3]. Решение этих вопросов позволило перейти от чисто камерной системы к столбовой системе отработки калийных пластов длинными очистными забоями с обрушением кровли. Данная технология учитывает объективные закономерности деформирования подрабатываемых и надрабатываемых породных массивов и формирование в них зон

разгрузки и повышенных напряжений, влияние гидрогеологических условий на отработку пластов, механизмы газодинамических проявлений и характер разрушения горных пород в окрестностях очистных и подготовительных выработок.

Особое внимание уделяется технологии селективной выемки продуктивных слоев с закладкой отработанного пространства пустой породой, технологии последовательной выемки сильвинитовых слоев прямым и обратным порядком отработки методом опережения или отставания верхней и нижней лав во времени.

Для обеспечения безопасной добычи калийных руд с использованием новых технологий на глубоких горизонтах предложена и применена структурная модель динамического взаимодействия подработанной толщи пород с лавами нижнего слоя при слоевой выемке калийных пластов, разработана методика прогноза динамических проявлений горного давления и технологические способы борьбы с ними, учитывающие повышенное напряженно-деформированное состояние налегающего породного массива на границах «горный массив – отработанное пространство».

Установлены рациональные параметры механизированных крепей для сложно-структурных трудноуправляемых кровель, адаптирован алгоритм прогноза опасных обрушений кровель в лавах при слоевой отработке, разработана система мониторинга горного давления и прогнозирования состояния основных технологических горных выработок [4].

С учетом окончания отработки основных продуктивных калийных горизонтов ведется вскрытие нижних и верхних горизонтов более раннего или позднего их геологического формирования девонского периода наклонными штреками. Для той цели разработаны и изготовлены современные проходческо-очистные комплексы роторного и избирательного действия типа КРП, КИД. Целый ряд таких машин изготовлен для РФ, Туркменистана, Румынии. Ярким свидетельством творческого подхода к созданию отечественной горной техники явилось создание семейства целенарезных машин серии МВБ в ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», предназначенных для различных заказчиков в Беларуси, Румынии, Эстонии и России. В зависимости от предполагаемых конкретных горнотехнических условий эксплуатации были разработаны и изготовлены три типа машин, отличающиеся наличием и компоновкой основных узлов, в том числе, не имеющие аналогов высококомобильные машины МВБ-140Р и МВБ-140Э (рисунок 3).

Постоянно совершенствуется технология обогащения полезных ископаемых флотационным и галургическим методами. Все технологические операции в основном оснащены современным отечественным оборудованием. Это – дробление, измельчение, флотация, вакуум-кристаллизация и грануляция. Ведется работа по использованию хвостов переработки калийной руды и созданию на их основе органоминеральных удобрений для сельского хозяйства. Совместно с НАН Беларуси (ГНУ «ИОНХ НАНБ») разработаны усовершенствованные технологии получения сложных минеральных удобрений: NPK, NKS, а также сульфата калия (рисунок 4).



Рисунок 3. – Машина врубовая баровая МВБ-140Э



**Рисунок 4. – Линия получения комплексных NPK-удобрений**

го камня – базальта, диабазы, гранита, песчано-гравийных месторождений [5]. Потребителям поставлены опытно-промышленные и серийные образцы высокомодернизированных шагающих экскаваторов и бурильных машин отечественной разработки.



**Рисунок 5. – Мобильная буровая установка МБУ «Медведь»**

Разумеется, не все проблемы в горнодобывающем и перерабатывающем комплексе, а также в горном машиностроении решаются молниеносно. Для этого требуются годы и десятилетия упорной творческой и научной работы и значительные материальные затраты. В этой работе важна активная поддержка профильных НИИ НАН Беларуси, которая в последние годы значительно активизировалась. В связке академической науки, отраслевых научно-исследовательских и проектно-конструкторских организаций, производителей горно-шахтного и обогащательного оборудования инновационные технологии в горном деле станут действительно прорывными.

Институтом почвоведения НАН Беларуси подтверждена высокая эффективность применения новых удобрений в растениеводстве.

Активно развиваются технологии бурения нефтегазовых скважин и производство оборудования для них. Так, уже поставлены первые мобильные буровые машины для бурения глубоких скважин и оборудование для капитального ремонта нефтяных и газовых скважин, а также оборудование для бурения боковых скважин (рисунок 5).

Разработаны технологии и оборудование для разработки меловых карьеров – источников сырья для производства цемента, а также для разработки карьеров природно-

### Заключение

В настоящее время, благодаря слаженной работе отечественных научных и инженерно-технических работников в области создания горно-шахтного и обогащательно-оборудования, а также технологии добычи и обогащения полезных ископаемых, достигнут наивысший за всю историю уровень развития горной промышленности в стране. Необходимым условием дальнейшего повышения эффективности горнодобывающей и горноперерабатывающей отраслей Беларуси является развитие Белорусского научно-производственного кластера горного машиностроения и горной технологии, сформированного на базе научно-производственных и производственных предприятий Солигорского промышленного региона в содружестве с рядом других академических, научно-исследовательских и производственных предприятий Беларуси. В связке академической науки, отраслевых научно-исследовательских и проектно-конструкторских организаций, производителей горно-шахтного и обогащательно-оборудования отечественные инновационные технологии в горном деле имеют большой потенциал, как для повышения эффективности добычи и переработки горно-минерального сырья в Беларуси, так и для увеличения экспорта услуг и горного оборудования.

### Список использованных источников

1. Смычник, А.Д. Разработка калийных месторождений / А.Д. Смычник, А.Б. Морев. – Минск: Интегралполиграф, 2012. – 400 с.
2. Михайлов, Ю.В. Строительство горных выработок специальными способами: учеб.-метод. пособие / Ю.В. Михайлов, В.Ф. Носков, В.Я. Прушак. – Минск: Тэхналогія, 2005. – 223 с.
3. Усенко, В.С. Теоретические подходы к расчету безопасной отработки пластовых месторождений, представленных многослойными горизонтальными пачками и слоями / В.С. Усенко, Н.А. Липницкий // Горная механика и машиностроение. – 2016. – № 1. – С. 13-19.
4. Поддержание выработок Старобинского калийного месторождения с помощью специальных видов крепи. Часть 1. Адаптация конструкции существующих анкеров повышенной несущей способности к местным условиям / Поляков А.Л. [и др.] // Горная механика и машиностроение. – 2017. – № 3. – С. 37-45.
5. Технологические схемы разработки обводненных песчаных, гравийно-песчаных и песчано-гравийных месторождений / С.Г. Оника [и др.] // Горная механика и машиностроение. – 2016. – № 2. – С. 5-8.

**Prushak V.Ya.**

### **Improving the efficiency of mining and processing mining of mineral raw materials on the basis of innovative development**

*The article analyzes problems of innovative development of the domestic mining industry. Shows the importance of establishing a scientific and industrial cluster mining industry and mining technology, research and production enterprises of Soligorsk industrial district and profile of leading research and design organizations of the country. Analyzed promising technical and technological solutions in the domestic mining industry. Shows the internal and external potential of the Belarusian mining equipment.*

*Keywords: mining engineering, enrichment, field, cluster, mineral resources, geotechnology, innovation.*

Поступила в редакцию 30.11.2017 г.

УДК 502/504+514.18

## ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛОКАЛЬНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИЗЕМНОГО АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ОТРАБОТАВШИМИ ГАЗАМИ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Кофанов А.Е. (Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев, Украина), Холковский Ю.Р. (Национальный авиационный университет Украины, г. Киев, Украина)

*Актуальность работы состоит в подборе оптимальных методов моделирования сложных многопараметрических систем, объектов и сред, что обусловлено значительным повышением требований к конечным результатам. В результате проведенного исследования установлено, что локальные величины атмосферных параметров во многом определяются типом подстилающей поверхности. В связи с этим предложен и адаптирован к задаче моделирования пространственных полей загрязнения придорожных территорий авторский дискретно-интерполяционный метод, разработан его алгоритм, и на его основе построена геометрическая модель распространения и локального концентрирования загрязнителей (компонентов отработавших газов автомобилей) в придорожном воздушном пространстве на участке автомагистрали (г. Киев, Украина). Установлено, что параметры и свойства предложенных дискретно-интерполяционных моделей могут иметь не только различную структуру, но и определенную анизотропность во времени и пространстве.*

**Ключевые слова:** *автотранспорт, загрязнение атмосферного воздуха, отработавшие газы, моделирование загрязнения придорожного воздушного пространства, дискретно-интерполяционный метод.*

### Введение

Автотранспортный комплекс (АТК) является одним из наиболее мощных источников загрязнения городской окружающей среды и, особенно, атмосферного воздуха. Например, в 2000 г. в Киеве доля загрязнения воздушного пространства автотранспортом составляла 68,95 % от общего объема загрязнений, в 2013 г. эта цифра увеличилась до 84,10 %, а к 2015-му году достигла почти 90 % [1, 2]. Экологическая ситуация в Киеве усугубляется еще и тем, что ежегодно на городских автомагистралях увеличиваются потоки транзитного транспорта, в том числе и грузового, а также транспорта из других регионов Украины. Согласно данным Государственной службы статистики Украины [3], только в 2016 г. автомобильным транспортом было перевезено 166900 тыс. т грузов (26,7 % от общего грузооборота), что на 12,7 % больше, чем в 2015 г. При этом услугами автомобильного транспорта воспользовались 2015,0 млн пассажиров – 41,7 % от общего объема пассажироперевозок.

Серьезной проблемой города и страны в целом является так называемое старение отечественного автопарка. Согласно статистическим данным, средний срок службы автотранспортного средства (АТС) в Украине составляет около 14-16 и даже, по некоторым источникам, 18 лет, тогда как этот же показатель в странах ЕС – всего 8 лет [4]. В связи с этим целью данного исследования является предварительная оценка загрязнения городской окружающей среды выбросами автотранспорта, создание на основе авторского дискретно-интерполяционного метода геометрических моделей рассеивания и локального концентрирования поллютантов в придорожном воздушном простран-

ве, а также краткосрочное прогнозирование развития ситуации, оценка вреда здоровью людей, причиняемого токсичными компонентами отработавших газов (ОГ) двигателей внутреннего сгорания (ДВС).

### Основная часть

Вредное воздействие выбросов ОГ двигателей внутреннего сгорания имеет очень широкий спектр действия и может проявляться у людей по-разному, в зависимости от состояния иммунной системы человека, имеющих хронических заболеваний, наследственности и т.д. Некоторые из поллютантов (в частности, бенз(а)пирен, альдегиды, оксид серы (IV) и оксиды азота и углерода) могут провоцировать затрудненность дыхания, астматические эффекты, вызывать хронические бронхиты и пневмонии, особенно у детей раннего возраста. Кроме того, канцерогены провоцируют рост опухолей, в том числе и злокачественных.

Высокая степень токсичности ОГ автомобилей, как правило, обусловлена неполным сгоранием углеводородного моторного топлива – бензина или дизельного топлива, а также возможными химическими превращениями при высоких температурах – пиролиза углеводородов, взаимодействия азота и кислорода воздуха. При этом объемы выбросов ОГ и особенно их токсичность зависят от конструкции и марки автомобиля, его технического состояния, условий и сроков эксплуатации, а также от вида и качества используемого топлива, технологии его производства, способов подачи топливно-воздушной смеси (ТВС), ее физико-химических и термодинамических свойств, режима сжигания в камере сгорания, ее конструкции, погодных и дорожных условий, опыта водителя, состояния дорожного полотна, материала шин и т.п. Известно, что даже незначительные нарушения в работе двигателя могут привести к увеличению объемов выбросов токсичных газов в атмосферу в несколько раз. Особенно опасными составляющими ОГ являются мелкодисперсные пылинки размером менее 10 нм, состоящие в основном из частиц сажи, аэрозолей масел, продуктов износа дорожного полотна, двигателей, шин и др., которые адсорбируют на своей чрезвычайно развитой поверхности другие вредные вещества (ВВ), в том числе тяжелые металлы, бенз(а)пирен и вместе с вдыхаемым воздухом попадают в организм человека.

В Украине функционирует единая система государственного мониторинга окружающей природной среды (ОПС), направленная на обеспечение соблюдения требований действующего законодательства по защите ОПС, рационального использования природных ресурсов и т.п. Наблюдения за качеством воздуха осуществляются на стационарных и маршрутных постах наблюдений (ПС); иногда для наблюдений за такими явлениями как задымление, газовые выбросы и др. применяются передвижные ПС. В частности, в Киеве полноценно функционируют 16 постов наблюдений.

Особое значение в современном мире играет прогнозирование локальных, региональных и др. загрязнений атмосферного воздуха, особенно для выработки управленческих решений в сфере охраны окружающей воздушной среды в периоды с опасными метеорологическими условиями. Известно много различных моделей, предоставляющих возможность решать те или иные задачи мониторинга загрязнений воздушного бассейна городов. Это, в частности, модели Э.А. Закарина и В.Ф. Крамара [5], А.В. Старченко и Д.А. Беликова [6], В.Г. Свинухова [7], Ф.В. Коршенко [8], С.Д. Кузниченко с коллегами [9], Н.Н. Беляева [10], В.М. Шмандия [11], А.Г. Шапара с коллегами [12] и др. [13, 14].

В 1978 г. коллективом Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова в сотрудничестве с Гидрометеоцентром СССР была разработана методика расчета

уровня загрязнения атмосферного воздуха большого города, которая в дальнейшем была усовершенствована и дополнена в 1986 году [15]. Эта методика до сих пор применяется в странах СНГ, однако она требует специального программного обеспечения, прецизионных мониторинговых данных и, как правило, не применяется для определения и оценки локальных загрязнений придорожных территорий. Существует также методика Е.М. Киптенко и Т.В. Козленко, применяемая для краткосрочного прогнозирования загрязнений воздушного бассейна, учитывающая метеорологические данные и основанная на пошаговой множественной регрессии [16, 17], а также методика Л.И. Гавриленко, которая при расчетах загрязнений воздуха метеорологические факторы не учитывает, а прогнозирование осуществляется на основе статистических данных по загрязнению воздуха определенными поллютантами и тенденций его ожидаемого изменения [18]. В частности, в последней модели прогноз базируется на предыдущих статистических данных по загрязнению окружающей среды определенными поллютантами и тенденций его ожидаемого изменения. Различные типы математических моделей были апробированы В.И. Затулой для прогнозирования загрязнений городского воздуха Киева (продолжительность прогноза – один год) [19].

Широкое распространение для краткосрочного и более длительного прогноза загрязнений атмосферного воздуха получили многопараметрические модели М.Е. Берлянда, основанные на статистических и синоптических данных, а также на методах химического и физико-химического анализа [20]. Большой вклад в решение проблем оценки и прогнозирования атмосферных загрязнений внесены работами И.Д. Лоевой [21-23]. Авторами [24] отмечается, что наилучших результатов по прогнозированию уровня загрязнения городского воздуха можно достичь, если разрабатывать два прогноза, один из которых прогноз для определенных источников загрязнения, а второй – прогноз для определенной территории города (района, микрорайона или города в целом). Это обусловлено тем, что в городе существует много различных источников загрязнения, выбросы которых суммируются, перемешиваются, вступают во взаимодействие между собой и с компонентами природной среды, образуя новые соединения. Все это создает условия для формирования однородных (фоновых) загрязнений воздушного бассейна города, которые распространяются на определенной территории и обуславливают уровень ее загрязнения.

Таким образом, разработка математических моделей для задач прогнозирования загрязнения атмосферного воздуха и прилегающих к автомагистралям территорий является актуальным заданием, учитывая возможность использования этих данных для контроля и регулирования выбросов ОГ ДВС, а также для разработки мероприятий по минимизации вредного воздействия со стороны автотранспорта на окружающую среду города и здоровье человека. Особенно важным представляется пространственно-временное прогнозирование локальных высоких уровней загрязнения на селитебных территориях и участках, расположенных вблизи магистрали, в периоды аномальных условий стратификации [15, 25-27].

Общеизвестно, что состояние приземного слоя воздуха и прилегающих к автомагистралям территорий зависит от многих факторов, которые, в свою очередь, также зависят от нескольких параметров. Это приводит к тому, что точную оценку взаимного влияния различных факторов на исследуемый объект или явление невозможно получить. С математической точки зрения процессы и явления, происходящие в воздушной среде и на прилегающих к автомагистралям территориях, относятся к динамическим, параметры которых непрерывно меняются как во времени, так и в пространстве. В связи с этим, именно дискретный способ представления геометрической информации о моделируемом объекте является одним из наиболее рациональных. Кроме того, такой

подход является универсальным, поскольку от континуальной (непрерывной) аналитической модели всегда можно перейти к модели дискретной [28].

Таким образом, для построения геометрической модели сложных и стохастических процессов массопереноса и осаждения вредных примесей в приземном слое атмосферного воздуха на участках придорожных территорий нами предлагается использовать дискретно-интерполяционный метод (ДИМ) [29, 30], который предусматривает построение однопараметрических множеств выделенных математических объектов (например, дискретного массива параметров, характеризующих слой воздушной среды или участок придорожной территории). Кроме того, для более точного воспроизведения природных и техногенных процессов и явлений, происходящих в приземном слое воздушного пространства и на поверхности исследуемой городской территории, целесообразно предусмотреть определенное усложнение математической модели путем повышения размерности дискретных интерполяционных схем. В частности, в работах [31, 32] рассматриваются двумерные, трехмерные и даже  $n$ -мерные схемы интерполяции.

Суть предлагаемого метода заключается в том, что для получения дискретных геометрических моделей различных криволинейных поверхностей и процессов, происходящих в придорожном пространстве на различных участках автомагистрали, используются интерполяционные полиномы Лагранжа (ИПЛ). Важным является то, что в данном методе необязательным является условие равномерного расположения узлов интерполяции (УИ); кроме того, существует возможность представления своего количества УИ по каждой из переменных [29].

Одна из основных задач интерполяции состоит в нахождении неизвестных значений исследуемой функции внутри определенного, заранее заданного интервала. При этом строится интерполяционная функция, проходящая через все экспериментальные (заданные) точки и приближенно заменяющая исходную функцию. Следовательно, при построении геометрических моделей распространения и концентрирования вредных примесей в воздушной среде исследуемых придорожных территорий необходимо уточнить смысл термина «узел интерполяции», поскольку это понятие является основополагающим в предложенном методе.

В данном исследовании под узлами интерполяции понимаются не точки (как в случае классической интерполяции), а более сложные математические объекты – линии, массивы, матрицы или процессы и системы, представленные в виде некоторых функционалов как совокупности их свойств и параметров, имеющих неоднородную структуру [29]. При этом термином «схема интерполяции» обозначаем схему расположения именно таких УИ. Полученные таким образом одно- или в общем случае  $n$ -параметрические множества и являются дискретными математическими моделями изучаемых многопараметрических объектов, процессов и явлений. В нашем исследовании это процессы, происходящие в придорожном воздушном пространстве или на поверхности участка исследуемой придорожной территории. Элементом такого множества (множеств) является определенная дискретная функция, функционал, который может быть представлен как дискретный численный массив, размерность которого варьируется в заданных пределах [29, 30].

Выбор вида интерполяционной функции является важной задачей. В частности, в предлагаемом нами методе (ДИМ) все функции, которые однозначно не могут быть спроектированы на одну из координатных осей или плоскостей, задаются неявно, в параметрической форме. А их интерполяция сводится к размещению в УИ определенных базовых функций – дискретных массивов, что дает возможность получить искомым функционал  $\Phi(p_m)$  с вектором параметров, содержащим:

- интерполяционный параметр;
- координатные переменные;
- параметры, характеризующие форму и положение объектов, а также физико-химические и/или экологические характеристики природных и техногенных процессов и явлений, происходящих в приземном слое воздушного пространства и на поверхности исследуемых участков придорожной территории:

$$\Phi(p_1, p_2, p_3, \dots, p_i, \dots, p_m) = M[i, j]. \quad (1)$$

Таким образом, интерполяционные полиномы, предлагаемые использовать при построении геометрических моделей загрязнения приземной воздушной среды, имеют вид [28, 31, 32]:

$$\Phi(u)_n = \sum_{i=0}^{n-1} F_i(p_1, p_2, \dots, p_m) \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^{n-1} \frac{u - u_j}{u_i - u_j}, \quad (2)$$

где  $u$  – параметр интерполяции;

$F(p_1, p_2, \dots, p_m)$  – узловая функция;

$p_1, p_2, \dots, p_m$  – параметры узловой функции;

$n$  – количество узлов интерполяции.

Для более сложных систем авторами [28, 31] предложено использовать двухмерную и выше интерполяцию, определяя при этом вид степенного многочлена  $\Phi_{m,n}(u, v)$  степени  $m$  по  $u$  и  $n$  по  $v$  и значение функционала  $F$  в произвольной точке с параметрами  $(u, v)$ . Геометрически это означает, что при двухмерной интерполяции через узловые точки проходит определенная поверхность  $Z = \Phi_{m,n}(u, v)$ . Построим сетку (рисунок 1), задав в ее узлах значения функции  $Z$ . При этом вся площадка распадется на  $mn$  прямоугольников, в один из которых попадает точка с координатами  $(u, v)$ . Процесс интерполяции проходит таким образом: сначала в определенных заданных пределах изменяется параметр  $u_i$  при фиксированных значениях параметра  $v_j$ . После этого переходим к параметру  $v_{j+1}$  и повторяем процедуру сначала.

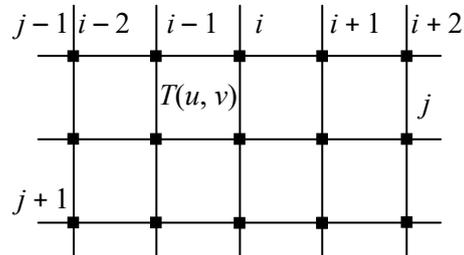


Рисунок 1. – Интерполяционная сетка [31]

Согласно такому алгоритму получаем двухмерную интерполяцию вида  $\Phi_{m,n}(u, v)$  степени  $m$  по  $u$  и степени  $n$  по  $v$ , то есть  $Z(u, v)$  в произвольной точке  $T(u, v)$ . При этом через узловые точки проходит поверхность  $Z = \Phi_{m,n}(u, v)$ , а формула для двухмерной интерполяции по Лагранжу будет выглядеть таким образом:

$$\Phi_{m,n}(u, v) = \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} F_{i,j}(p_1, p_2, \dots, p_t) \prod_{\substack{p=0 \\ p \neq i}}^{m-1} \prod_{\substack{q=0 \\ q \neq j}}^{n-1} \frac{(u - u_i)(v - v_j)}{(u_p - u_i)(v_q - v_j)}. \quad (3)$$

В случае трехмерной интерполяции, которую мы будем применять для геометрического моделирования загрязнений придорожного воздушного пространства, через узловые точки будет проходить уже гиперповерхность, являющаяся многочленом трех переменных  $(u, v, w)$ , а формула интерполяции будет иметь вид:

$$\Phi_{k,m,n}(u,v,w) = \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} \sum_{k=0}^{k-1} F_{i,j,k}(p_1, p_2, \dots, p_l) \prod_{\substack{p=0 \\ p \neq i}}^{m-1} \prod_{\substack{q=0 \\ q \neq j}}^{n-1} \prod_{\substack{r=0 \\ r \neq k}}^{k-1} \frac{(u-u_i)(v-v_j)(w-w_k)}{(u_p-u_i)(v_q-v_j)(w_r-w_k)}, \quad (4)$$

где  $k, m, n$  – количество УИ по каждой из переменных;

$u, v, w$  – интерполяционные параметры координат;

$p_1, p_2, \dots, p_l$  – формообразующие, физико-химические и/или экологические (геоэкологические, метеорологические) параметры.

Степень выражения (4) оказывается достаточно большой –  $k \times m \times n$ , однако по каждой из указанных переменных количество УИ может варьироваться произвольно. При этом многочлен минимальной степени можно получить при треугольной интерполяции, а количество УИ определяется как  $N = \frac{(n+1)(n+2)}{2}$ , что значительно меньше,

чем для прямоугольной сетки (примерно в 2 раза) [33]. Подставляя в УИ дискретный численный массив с совокупностью параметров исследуемой системы процесса или явления (даже в случае, если эти параметры являются разными и анизотропными), на основе выражений (3) и (4) получаем искомые дискретно-интерполяционные (геометрические) модели распространения и концентрирования вредных примесей в приземном воздушном пространстве. В случае  $n$ -мерной интерполяции через узловые точки также проходит гиперповерхность, которая является многочленом  $n$  переменных, а формула будет иметь аналогичный вид [33].

Для корректного применения ДИМ к моделированию и прогнозированию процессов массопереноса ВВ и их концентрирования в придорожном пространстве необходимо ввести критерий интерполяции. Это связано с тем, что интерполяционный полином фактически является усеченным аналогом ряда Тейлора, поскольку он ограничен степенью  $n$ . Поэтому для обеспечения сходимости соответствующего аналога ряда Тейлора необходимо падение абсолютной величины коэффициента при переменной  $u$  с ростом степени  $n$ . Таким образом, критерием хорошей аппроксимации в случае многомерной интерполяции является падение абсолютных величин производных по всем переменным с ростом их порядка. Предлагаемый метод позволяет не только моделировать сложные экологические системы, процессы и явления, но и прогнозировать их поведение, а также развитие. Особенно актуально это для многопараметрических процессов, параметры которых могут меняться как в пространстве, так и во времени. Кроме того, в случае, когда проводятся интерполяции различных функций, но при одних и тех же значениях массива аргументов (например, как в нашем случае), удобно применять именно ИПЛ, поскольку коэффициенты Лагранжа не зависят от интерполируемой функции и могут быть вычислены заранее [34].

Получив формулу интерполяции дискретных массивов в общем случае, мы сможем моделировать сложные объекты, процессы и явления, происходящие в придорожном воздушном пространстве, а также прогнозировать геоэкологическое состояние исследуемых территорий города.

В исследовании предлагается следующий алгоритм построения геометрической модели процессов, происходящих в придорожном воздушном пространстве (таблица). При этом базы данных для формирования узловых функций модели содержат следующие блоки информации:

- метеорологические параметры (направление и сила ветра, температура и влажность воздуха, наличие и характер осадков, коэффициент стратификации атмосферы);
- географические и геометрические особенности исследуемых участков магистрали и примагистральной территории;

- данные об интенсивности и распределении транспортных потоков на экспериментальных участках трассы;
- расчетные данные по выбросам ВВ в атмосферный воздух различными транспортными средствами.

Таблица. – Алгоритм построения геометрической модели распространения и локального концентрирования загрязнителей в придорожном воздушном пространстве

Этап	Содержание этапа
Первый	Сбор информации о моделируемом объекте (процессе, явлении). Далее определяются все факторы, имеющие сильное влияние на состояние объекта (процесса, явления), выявляются и описываются существенные связи между параметрами. Несущественными параметрами пренебрегаем, и в дальнейших расчетах они не учитываются.
Второй	Формируются узловые функции в виде дискретных линий, причем их дискретной математической моделью являются одномерные многочисленные массивы. Форма линий может быть произвольной или выбранной по заранее заданным условиям. Дискретные массивы формируются в разработанном автором графическом редакторе [30]. Определяются начальные и граничные условия. Под ними понимаются пределы изменения определенных параметров, в том числе и геометрических.
Третий	Сформированные базы данных, а это могут быть дискретные численные массивы определенной размерности с набором некоторых параметров, а именно – узловые функции, используются в работе основной моделирующей программы, что позволяет получить дискретную геометрическую модель процесса, явления или поверхности, а также осуществить ее визуализацию.
Четвертый	Критический анализ и верификация корректности полученных геометрических моделей.
Пятый	Визуализация полученных геометрических моделей распространения и локального концентрирования поллютантов в приземном слое атмосферного воздуха на придорожных участках автомагистрали.

Отметим, что при моделировании поверхностей могут быть использованы различные дискретные функции, как по количеству, так и по расположению в узловых плоскостях. Следовательно, поверхности могут быть построены при помощи только одной дискретной функции или двух, трех и т.д. с использованием различных схем интерполяции для каждого конкретного случая формирования дискретного базиса. Разнообразие схем интерполяции получается с помощью вариаций расположения УИ (то есть для одного и того же дискретного базиса получим различные поверхности), изменения положения самих узловых дискретных функций в плоскостях УИ и др.

Исследованию влияния орографии местности на рассеивание и концентрирование поллютантов в атмосферном воздухе посвящено много работ. В частности, в работе М.З. Згуровского с коллегами [35] отмечается, что в поверхностном слое воздуха вследствие топографических особенностей местности возникают специфические поля турбулентности, приводящие к изменениям как горизонтальных, так и вертикальных воздушных потоков, а также распределений температуры и влажности. В свою очередь, эти факторы оказывают определяющее влияние на диффузию ВВ в воздушном бассейне.

не большого города, способствуя их перемешиванию и/или концентрированию [36]. При этом возможно не только рассеивание и распространение загрязняющих веществ на прилегающие территории, но и формирование локальных полей загрязнения, обусловленных свойствами подстилающей поверхности, а также взаимным влиянием ранее перечисленных факторов. В работах [37, 38] показано, что автомагистраль (транспортный поток) можно рассматривать и моделировать как линейный источник выбросов вредных веществ, закономерности диффузии которых зависят от высоты источника выбросов АТС над уровнем земли, стратификации, скорости ветра, условий движения и характеристик транспортного потока, орографии подстилающей поверхности, характера городской застройки и т.п.

Кроме того, в случае плотной многоэтажной застройки исследуемой территории необходимо учитывать свойства так называемого уличного каньона и наличие «дворовых колодцев», в которых создаются особые условия для формирования локальных потоков, имеющих зоны повышенных скоростей, а также застойные зоны [39]. Растительность, особенно высокие деревья, а также городские парки, скверы сильно влияют на характеристики ветрового потока и особенности диффузии ВВ в атмосферном воздухе, образуя так называемую полупроницаемую среду. В таких местах за счет частичного поглощения ВВ происходит очистка воздуха от примесей. Водные объекты, расположенные на территории города, также способны поглощать ВВ, создавая барьер для их дальнейшего распространения.

В данном исследовании с целью моделирования и прогнозирования состояния придорожного воздушного пространства предлагается выделить следующие подуровни приземного воздушного пространства. В частности, первый подуровень – от поверхности земли до высоты 1 м, что обусловлено возможным воздействием на детский организм; второй подуровень составляет от 1 до 2 м, причем высота этого подуровня определяется ростом взрослого человека. Третий подуровень – от 2 до 3 м от уровня земли – определяется нахождением людей в трамваях, троллейбусах, автобусах, маршрутных такси и др., особенно летом с открытыми окнами. Четвертый – от 3 м от уровня земли и до высоты крыш зданий, расположенных вдоль автомагистрали. Исследование последнего подуровня также является важным, учитывая возможное проникновение поллютантов в дома, помещения учебных заведений, офисы и др.

Известно, что в нижнем слое воздушного пространства скорость ветра, как правило, меньше, чем в более высоких слоях, а, следовательно, в таком случае, особенно на нижних подуровнях, создаются дополнительные условия не только для чрезмерного накопления вредных веществ, но и для повышенной угрозы здоровью людей. Кроме того, городскую среду часто и справедливо называют «островом тепла», поэтому в результате конвекции теплые потоки воздуха поднимаются вверх (плотность теплого воздуха меньше, чем холодного), а загрязненный воздух в связи с создающимся приземным разряжением атмосферы направляется горизонтально от периферии к центру. А если при этом наблюдаются еще и температурные инверсии (когда температура меняется в противоположном направлении, т.е. увеличивается с высотой), то это кардинально влияет на характер рассеяния и локального концентрирования ВВ в воздухе над поверхностью земли.

Для примера нами смоделирован участок полотна автомобильной дороги, находящийся на улицах Жилианская и Борщаговская (на участке Площадь Победы – ул. Политехническая – ул. Академика Янгеля – ул. Вадима Гетьмана), имеющего двухстороннее движение транспортных потоков с линиями скоростного трамвая. Выбор участка для моделирования обусловлен тем, что вдоль данной автомагистрали практически не защищены деревьями или другими растительными барьерами расположены

учебные корпуса Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» (в порядке следования – корпуса № 9, 21, 19, 18 и 22; в некотором отдалении – корпус № 12), а также общежития университета № 19 и № 20, которые находятся прямо на участке изгиба дорожного полотна.

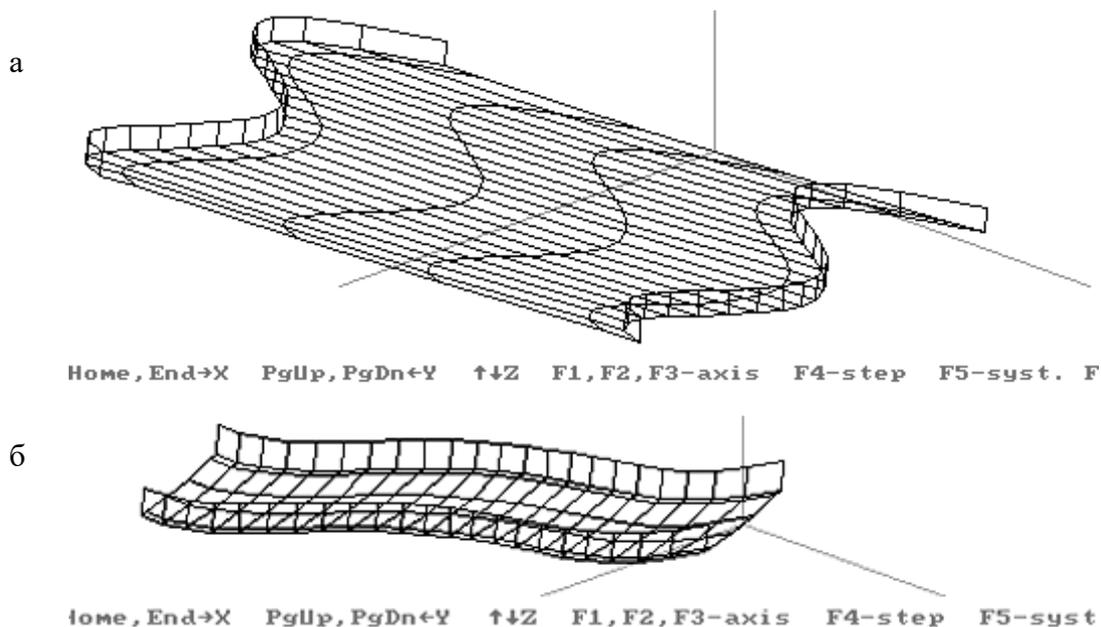
Местонахождение исследуемого участка магистрали на карте г. Киева, а также посты наблюдения за движением транспортных потоков показаны на рисунке 2.



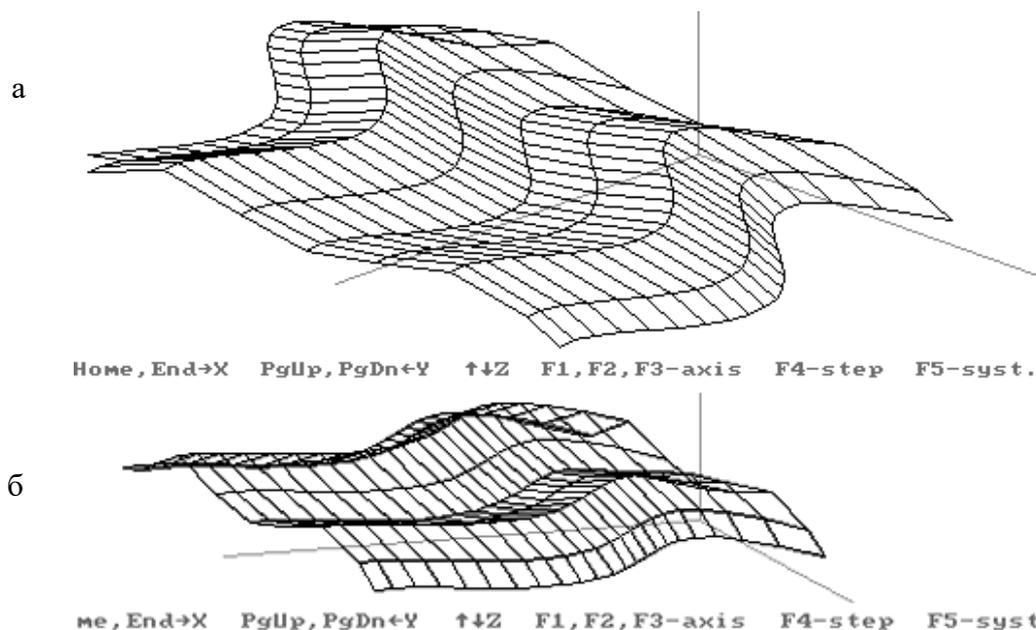
**Рисунок 2. – Исследуемый участок дорожного полотна автодороги Площадь Победы – ул. Политехническая – ул. Академика Янгеля – ул. Вадима Гетьмана, находящийся на улицах Жилианская и Борщаговская (г. Киев, Украина), а также обозначенные на нем посты наблюдения за транспортными потоками**

На данном участке отсутствуют регулируемые светофорами перекрестки, поэтому в случае отсутствия заторов транспортные потоки движутся непрерывно и с условно постоянной скоростью. На рисунке 3 представлен результат моделирования поверхности дорожного полотна данного участка с учетом геофизических координат и масштабирования.

Следует отметить, что в случае отсутствия сильного (ураганного) ветра скорость движения газообразных веществ на высоте до 3 м от уровня земли можно принять равной скорости транспортного потока, а направление – совпадающим (т.е. движение потока приближенно можно считать ламинарным). Это, главным образом, относится к воздушному пространству по краям дороги и на пешеходных тротуарах. Обстановка и, соответственно, распределение газообразных загрязняющих веществ будет резко меняться на тех участках дороги, где встречаются воздушные массы двух противоположно движущихся потоков. Тут, как правило, степень загрязнения атмосферного воздуха увеличивается, и на таких участках формируется опасное локальное загрязнение территории. Кроме того, степень загрязнения воздушных потоков может резко возрасти на так называемых геометрических барьерах (например, резких изгибах дороги, ее поворотах или разветвлениях на перекрестке (рисунок 4)).



**Рисунок 3. – Результаты (ракурсы а и б) моделирования поверхности дорожного полотна исследуемого участка автомагистрали (г. Киев, Украина) с учетом геофизических координат и масштабирования**



**Рисунок 4. – Результаты (ракурсы а и б) моделирования распределения концентрации газообразного компонента X отработавших газов АТС**

Согласно приведенному в таблице алгоритму, моделировали распределение условного газообразного компонента ( $X$ ), являющегося ингредиентом отработавших газов АТС. При этом в нашем конкретном случае учитывали распределение компонента  $X$  с градацией концентраций в пределах от 0 до 5 (кратность) в поперечном сечении дорожного полотна исследуемого участка дороги, а также наличие трамвайных линий по центру и тротуаров по обе стороны дороги. Считая рассмотренную функцию распреде-

ления газообразного компонента  $X$  в качестве узла интерполяции и используя рассмотренный ранее дискретно-интерполяционный метод моделирования с последующей визуализацией (уравнения (1)-(4)), получаем прогнозную модель пространственного распределения концентрации загрязняющего вещества  $X$  (компонента отработавших газов АТС) в придорожном воздушном пространстве (рисунок 4).

Учитывая то, что протяженность дорожного полотна значительно больше поперечного сечения дороги, условно введено масштабирование с различными коэффициентами. В частности, коэффициент масштабирования вдоль протяженности дорожного полотна взят на порядок больше. Разумеется, это не повлияло на общую картину распределения концентрации загрязняющего вещества. Надписи под рисунками являются служебными командами моделирующей программы. Предполагалось также, что интенсивность движения транспортного потока в обоих направлениях более-менее постоянна при отсутствии пробок и серьезных дорожных развязок.

Из рисунков 3 и 4 видно, что максимальная концентрация поллютанта  $X$  наблюдается посередине встречных полос дорожного полотна с постепенным уменьшением к обочинам (включая тротуары). Однако поскольку трамвайные линии проходят по центру дорожного полотна, то на данном участке дороги распределение концентрации компонента  $X$  носит неоднозначный характер. При этом важно заметить, что локальные загрязнения, обусловленные геометрическими барьерами и топографией местности, отрицательно сказываются на здоровье пешеходов, людей, ожидающих транспорт на остановках, а также тех, кто ежедневно и достаточно долго находится в транспорте (в частности, в скоростном трамвае), вдыхая, можно без преувеличения сказать, отравленный воздух.

Аналогично могут быть смоделированы и построены поля рассеивания и локального концентрирования других газообразных компонентов выбросов АТС. Более сложную картину распределения показывают мелкодисперсные твердые частицы (PM) и жидкие капельки аэрозоля. Однако широкая вариативность метода позволяет моделировать и получать наглядную визуализацию пространственного распределения компонентов автомобильных выбросов с учетом фактических геометрических характеристик полотна дорожных трасс, топографии городской местности, выбросов вредных веществ движущимися транспортными потоками, погодных условий. При этом температурный режим был взят для самого жаркого месяца года, также предполагалось отсутствие атмосферных осадков и сильного ветра.

### Выводы

1. Установлено, что локальные величины атмосферных параметров во многом определяются типом подстилающей поверхности.

2. В работе предложен и адаптирован к задаче моделирования загрязнения придорожного воздушного пространства авторский дискретно-интерполяционный метод, построена геометрическая модель распределения и локального концентрирования газообразных поллютантов, сделан вывод об опасности этих локальных загрязнений для здоровья людей, находящихся или живущих и работающих рядом с автомагистралями.

3. Использование авторского дискретно-интерполяционного метода предполагает:

- разработку алгоритма построения геометрической модели распространения и локального концентрирования загрязнителей в придорожном воздушном пространстве;
- построение дискретных геометрических моделей распределения поллютантов – компонентов выхлопных газов автомобилей. При этом параметры и свойства

дискретно-интерполяционных моделей могут иметь не только различную структуру, но и определенную анизотропность во времени и пространстве.

4. Использование полученных моделей локального загрязнения придорожного воздушного пространства дает возможность сделать краткосрочный прогноз относительно его геоэкологического состояния и опасности для здоровья людей.

### Список использованной литературы

1. Статистичний щорічник м. Києва за 2013 рік [статистичний довідник]. – К.: Консультант, 2014. – 344 с.
2. Статистичний щорічник м. Києва за 2015 рік / Державна служба статистики України. Головне управління статистики у м. Києві; за ред. Р.Г. Віленчук. – К., 2016. – 23 с.
3. Державна служба статистики України [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ukrstat.gov.ua>. – Дата доступа: 25.10.2017.
4. Сьогодні [Електронний ресурс]. Режим доступа: <https://ukr.segodnya.ua/economics/avto/avtohlam-na-dorogah-polovinu-mashin-ukraincev-nuzhno-utilizirovat-1061721.html>. – Дата доступа: 29.10.2017.
5. Закарин, Э.А. Программный комплекс моделирования случаев высокого загрязнения атмосферы города Алма-Аты / Э.А. Закарин, В.Ф. Крамар // Метеорология и гидрология. – 1991. – № 12. – С. 11-19.
6. Старченко, А.В. Численная модель для оперативного контроля уровня загрязнения городского воздуха / А.В. Старченко, Д.А. Беликов // Оптика атмосферы и океана. – 2003. – № 7. – С. 657-665.
7. Свинухов, В.Г. Физико-статистический способ прогноза загрязнения атмосферы в городе / В.Г. Свинухов // Метеорология и гидрология. – 1993. – № 8. – С. 41-47.
8. Коршенко, Ф.В. Статистический прогноз состояния загрязнения / Ф.В. Коршенко // Труды УкрНИИ Госкомгидромета. – 1987. – Вып. 224. – С. 41-44.
9. Кузниченко, С.Д. Географические информационные системы: области применения, сравнительный анализ ГИС-пакетов / С.Д. Кузниченко, Н.Г. Сербов, Ю.А. Кругляк // Метеорологія, кліматологія та гідрологія. – 2002. – Вип. 45. – С. 153-161.
10. Беляев, Н.Н. Методы экспресс расчета уровня загрязнения атмосферы / Н.Н. Беляев, Е.Д. Коренюк, В.К. Хрущ. – Днепропетровск: Наука и образование, 2002. – 192 с.
11. Шмандій, В.М. Сучасні методи контролю забруднення атмосферного повітря при управлінні техногенною безпекою на регіональному рівні / В.М. Шмандій, О.М. Касімов, А.М. Кучук. – Харків: КДПУ, 2001. – 136 с.
12. Системний підхід при прогнозуванні стану атмосферного повітря / А.Г. Шапар [та ін.]. – Дніпродзержинськ: Дніпродзерж. держ. техн. ун-т., 2004. – 164 с.
13. Прусов, В.А. Математичне моделювання атмосферних процесів: підручник / В.А. Прусов, С.І. Сніжко. – К.: Ніка-Центр, 2005. – 496 с.
14. Сніжко, С.І. Урбометеорологічні аспекти забруднення атмосферного повітря великого міста: монографія / С.І. Сніжко, О.Г. Шевченко. – К.: Вид-во географічної літератури «Обрії», 2011. – 297 с.
15. Методические указания по прогнозированию загрязнения воздуха в городах с учетом метеорологических условий: РД 52.04.78-86. – Л.: Гидрометиздат, 1986. – 60 с.
16. Кіптенко, Є.М. Прогнозування рівнів високого забруднення атмосферного повітря у містах України / Є.М. Кіптенко, Т.В. Козленко // Наук. праці УкрНДГМІ. – 2002. – Вип. 250. – С. 288-298.

17. Кіптенко, Є.М. Вплив метеорологічних умов забруднення повітря у промислових містах України / Є.М. Кіптенко, Т.В. Козленко // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. – 2007. – № 13. – С. 208-216.
18. Гавриленко, Л.И. К оценке уровня загрязнения атмосферы по прогнозу тенденции его изменения / Л.И. Гавриленко // Труды УкрНИИ Госкомгидромета. – 1988. – Вып. 227. – С. 52-59.
19. Затула, В.И. Метеорологический режим и загрязнение воздуха в больших городах Украины (на примере Киева): дис. ... канд. геогр. наук: 11.00.09 / В.И. Затула. – К., 1992. – 199 л.
20. Берлянд, М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы / М.Е. Берлянд. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 182 с.
21. Лоева, И.Д. Статистические методы анализа, прогноза и оптимального планирования уровня загрязнения атмосферы большого города: автореф. дис. ... д-ра геогр. наук: 11.00.09. 60 / И.Д. Лоева. – Одесса, 1991. – 37 с.
22. Лоева, И.Д. Оптимизация планирования уровня загрязнения атмосферы большого города выбросами промышленных предприятий / И.Д. Лоева, М.А. Тимошук // Метеорология, климатология, гидрология. – 2003. – Вып. 46. – С. 49-55.
23. Лоева, И.Д. Прогноз поля загрязнения воздушного бассейна города двуокисью азота / И.Д. Лоева, Салим Рубайя Санд // Метеорология, климатология и гидрология. – 1995. – Вып. 32. – С. 107-113.
24. Раменский, Л.А. О результатах исследования загрязнения атмосферы сернистым газом в промышленном городе / Л.А. Раменский // Труды УкрНИИ Госкомгидромета. – 1982. – Вып. 188. – С. 83-85.
25. Сонькин, Л.Р. Некоторые возможности прогноза содержания примесей в городском воздухе / Сонькин, Л.Р. // Труды ГГО им. А.И. Воейкова. – 1968. – Вып. 234. – С. 121-126.
26. Сонькин, Л.Р. Об обработке и анализе наблюдений за загрязнением воздуха в городах / Л.Р. Сонькин, Д.В. Чаликов // Труды ГГО имени А.И. Воейкова. – 1968. – Вып. 207. – С. 51-55.
27. Сонькин, Л.Р. Синоптический анализ и прогноз загрязнения атмосферы / Л.Р. Сонькин, В.Д. Николаев // Метеорология и гидрология. – 1993. – № 5. – С. 14-20.
28. Кофанов, О.Є. Обґрунтування застосування дискретно-інтерполяційного підходу для геометричного моделювання процесів у придорожньому просторі / О.Є. Кофанов, Ю.Р. Холковський // Актуальні питання проблеми створення та експлуатації технічних систем: матеріали Міжвузівської наук.-практ. конф. молодих вчених та студ., Кривий Ріг, 21 квітня 2017 р. / Видавничий центр ДВНЗ «КНУ». – Кривий Ріг, 2017. – С. 170-172.
29. Холковський, Ю.Р. Моделювання багатопараметричних процесів та систем на основі дискретно-інтерполяційного підходу в екології / Ю.Р. Холковський // VIII Всеукр. наук. Таліївські читання, Харків, 19-20 квіт. 2012 р. / Харківський нац. ун-т ім. В. Н. Каразіна. – Харків, 2012. – С. 204-207.
30. Холковський, Ю.Р. Побудова геометричних моделей технічних об'єктів із використанням дискретно-інтерполяційного підходу / Ю.Р. Холковський // Сучасні проблеми геометричного моделювання: збірн. матер. XVI Міжнар. наук.-практ. конф. Вип. 1, Мелітополь, червень 2014 р. – Мелітополь, 2014. – С. 138-143.
31. Холковський, Ю.Р. Моніторинг екологічних процесів і систем із застосуванням дискретно-інтерполяційного підходу / Ю.Р. Холковський, О.В. Кофанова, М.Ю. Березівський // Efektivní nástroje moderních věd – 2013: Materiály IX mezinárodní

vědecko-praktická konf. Díl 37. Ecologie. Zeměpis a geologie, Praha / Publishing House "Education and Science" s.r.o. – S. 35-37.

32. Холковський, Ю.Р. Геометричне моделювання складних технічних форм із наперед заданими умовами на основі дискретно-інтерполяційного підходу / Ю.Р. Холковський // Техніка, енергетика, транспорт АПК. – 2016. – № 2 (94). – С. 61-66.

33. Холковський, Ю.Р. Деякі аспекти моделювання багатопараметричних екологічних об'єктів, процесів та явищ / Ю.Р. Холковський, М.Ю. Березівський // Динаміката на сьвременната наука: матер. за 9-а междунар. науч. практ. конф. Т. 10. Біології. Екологія. Географія і геологія. Хімія і хімічески технології. Селско стопанство. Ветеринарна наука, Софія, 2013 г. / «Бял ГРАД-БГ» ООД. – Софія, 2013. – С. 29-31.

34. Лазарев, Ю.Ф. Моделювання на ЕОМ: навч. посібник / Ю.Ф. Лазарев. – К.: Політехніка, 2007. – 290 с.

35. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / М.З. Згуровский [и др.]. – К.: Наукова думка, 1997. – 367 с.

36. Паращук, Е.М. Результаты моделирования распространения выбросов автотранспорта на ограниченной территории города / Е.М. Паращук, В.Н. Коваль, М.Н. Прокопенко // Экологические системы и приборы. – 2007. – № 3. – С. 56-59.

37. Комаров, Ю.Я. Технология очистки городских автомагистралей от вредных выбросов транспортных потоков / Ю.Я. Комаров, В.Н. Федотов, С.В. Колесников // Экологические системы и приборы. – 2004. – № 11. – С. 21-24.

38. Прищепов, О.Ф. Оцінка стану забруднення атмосферного повітря оксидом вуглецю на автомагістралях міста Миколаєва / О.Ф. Прищепов, О.С. Левицька // Наукові праці: Науково-методичний журнал. Техногенна безпека. – Вип. 64, Т. 77. – 2008. – С. 70-74.

39. Абрамовський, Є.Р. Атмосфера великих міст / Є.Р. Абрамовський, В.І. Карплюк, М.М. Переметчик. – Дніпропетровськ.: Наука і освіта, 2011. – 350 с.

---

**Kofanov O., Kholkovskiy Yu.**

### **Geoecological aspects of modeling of local pollution of surface atmospheric air by exhaust gases of motor vehicles**

*The relevance of this work is based on the determination of the optimal methods of modeling complex multi-parameter systems, objects, and media in connection with a significant increase of the requirements for the final results. As a result of the investigation, it was found out that the local values of the atmospheric parameters are largely determined by the type of the underlying surface. The author's discrete interpolation method of geometric modeling of the complex multi-parameter systems, objects and media was applied. It involves the development of an algorithm for constructing a geometric model of distribution and local concentration of pollutants in a roadside airspace. It also helps to obtain discrete geometric models of the distribution of exhaust gas components. In addition, it was established that the parameters and properties of the discrete-interpolation models can have not only a different structure but also certain anisotropy in time and space.*

**Keywords:** motor transport, air pollution, exhaust gases, modeling of pollution of roadside airspace, discrete interpolation method.

Поступила в редакцію 31.10.2017 г.

**МАШИНОСТРОЕНИЕ**

УДК 621.926.4

**МОДЕЛЬ ИСТИРАЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ИЗМЕЛЬЧАЕМОГО МАТЕРИАЛА НА ЛОПАСТИ РОТОРА УДАРНО-ЦЕНТРОБЕЖНОЙ МЕЛЬНИЦЫ**

Вайтехович П.Е. (УО «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск, Беларусь)

*В статье предложена модель истирающего воздействия частиц измельчаемого материала на лопасти ротора ударно-центробежной мельницы и метод расчета объемной интенсивности износа. Для его реализации определены относительная скорость, сила давления и глубина внедрения частиц в поверхность лопастей. Получена зависимость интенсивности износа от угловой скорости ротора. Показано, что его расчетные значения несколько меньше экспериментальных. Это говорит о необходимости учета ударно-абразивного изнашивания.*

Ключевые слова: мельница, износ, частица, лопасть, относительная скорость, сила давления, глубина лунки, срезаемый металл.

**Введение**

В горнорудной, химической промышленности широко используются дробилки и мельницы ударного действия. Их неоспоримые преимущества – высокая производительность и степень измельчения, простота конструкции. Но одновременно максимальные проблемы в этих агрегатах возникают из-за высокого абразивного износа рабочих органов, особенно вращающихся с высокой частотой. По этой причине при эксплуатации существующих и создании новых образцов измельчителей ударного действия необходимо прогнозировать возможный уровень износа отдельных узлов и деталей таких машин.

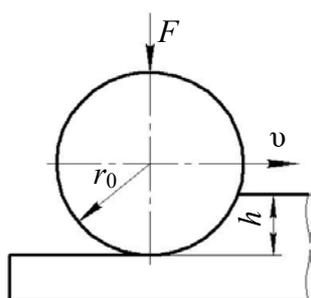
Наиболее основательные исследования по абразивному износу элементов измельчителей ударного действия проведены Клейсом [1]. Им установлено, что износ – это сложный процесс, зависящий от скорости удара, угла атаки, размера и концентрации частиц абразива, их влажности, а также твердости металла и частиц измельчаемого материала. В монографии [1] приведено большое количество экспериментальных данных, обобщенных в виде эмпирических зависимостей. Одновременно сделана попытка оценки аналитических моделей для расчета абразивного износа. Например, указано, что наиболее адекватной из них является модель Бекмана-Гоцмана [2].

Из анализа, проведенного в работе [1], можно сделать вывод, что все эти модели базируются на ударном взаимодействии частиц измельчаемого материала с элементами рабочих органов. И для большинства мельниц ударного действия это вполне оправдано. Но вот ротор ударно-центробежных мельниц [3] не участвуют напрямую в разрушении материала, а служит только для разгона частиц с последующим их ударом об отбойный элемент. Лопасти ротора-ускорителя, преимущественно, подвергаются истирающему воздействию абразивного измельчаемого материала. В связи с этим возникла необходимость в разработке физической модели этого процесса и его математического описания.

**Основная часть**

Абразивный износ при истирании по своей сути подобен шлифованию [4]. Изучение теоретических основ этого процесса показало, что здесь, как и при ударном воздействии [1, 2], теоретические аспекты процесса рассматриваются на элементарном уровне, сравнимым с размером одиночного зерна [5] с последующим интегрированием. Наиболее адекватной теоретической моделью следует считать модель Ходакова [6]. Она основана на том, что одиночное зерно абразива срезает слой материала при движении вдоль поверхности, рисунок 1.

По аналогии с ударной моделью [1] примем в качестве параметра, характеризующего износ, объемную интенсивность изнашивания:



$$W = \frac{Q_m}{Q}, \tag{1}$$

где  $Q_m$  – объем металла, срезаемый в единицу времени одиночным зерном,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$Q$  – расход абразива через элементарную площадку,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

В общем случае расход:

$$Q = Sv, \tag{2}$$

**Рисунок 1. – Физическая модель износа**

где  $S$  – площадь проходного сечения,  $\text{м}^2$ .

$v$  – скорость движения,  $\text{м}/\text{с}$ .

Сыпучий материал можно рассматривать как сплошную среду [7]. Тогда в нем выделяется элементарная площадка в виде квадрата со стороной  $2r_0$ , в которую вписана окружность радиусом  $r_0$ , соответствующим размеру зерна. Площадь этой ячейки  $S = 4r_0^2$ .

Доля заполнения указанной ячейки материалом характеризуется коэффициентом разрыхления:

$$\mu = \frac{S_0}{S} = \frac{\pi r_0^2}{4r_0^2} = 0,785, \tag{3}$$

где  $S_0$  – площадь сечения одного зерна,  $\text{м}^2$ .

Тогда с учетом (2) и (3):

$$\begin{aligned} Q_m &= S_m v_0; \\ Q &= \mu S v, \end{aligned} \tag{4}$$

где  $S_m$  – площадь сегмента срезанного металла,  $\text{м}^2$ ;

$v_0$  и  $v$  – скорости среза металла и движения абразива,  $\text{м}/\text{с}$ .

Обычно принимается  $v_0 = v$ . Тогда интенсивность износа из соотношения объемов превращается в соотношение площадей:

$$W = \frac{S_m}{4\mu r_0^2}. \tag{5}$$

Это безразмерная величина, но условно в системе СИ ее размерность будет  $\text{м}^3/\text{м}^3$ . Поскольку объем срезанного материала значительно меньше расхода абразива, то численное значение этого параметра будет очень малым. Для удобства использования предложена [2] внесистемная единица измерения интенсивности износа в  $\text{мм}^3/\text{кг}$ . Поэтому формула (5) трансформируется к виду:

$$W = \frac{S_m}{4\mu r_0^2 \rho} 10^9, \quad (6)$$

где  $\rho$  – плотность абразива, кг/м<sup>3</sup>.

Применимость такого подхода, основанного на сплошности среды, можно проверить через производительность агрегата по измельчаемому (абразивному) материалу. Для этого определим толщину слоя материала на лопасти.

$$\delta = \frac{kQ}{\tilde{v}H}, \quad (7)$$

где  $k$  – кратность циркуляции;

$\tilde{v}$  – средняя скорость движения материала вдоль лопасти, м/с;

$H$  – высота лопасти, м.

Если  $\delta > 2r_0$ , то монослой толщиной  $2r_0$  движется вдоль лопасти без разрыва, и предложенная модель применима. Более того, в данном случае не надо проводить интегрирование (суммирование) по элементарным ячейкам, а на основе полученных данных можно оценивать износ по всей лопасти ротора.

Чтобы рассчитать интенсивность износа по формуле (6) необходимо определить глубину внедрения  $h$  (рисунок 1) сферического зерна в поверхность металла под действием силы  $F$  и затем площадь сегмента  $S_m$ .

Сила давления  $F = N$ , где  $N$  – реакция связи. Она зависит от инерционных сил.

Выражения для ее расчета можно получить по силовой схеме, рисунок 2. В соответствии с ней:

$$N = F_c = 2m\omega v_d, \quad (8)$$

где  $m$  – масса зерна, кг;

$\omega$  – угловая скорость ротора, рад/с;

$v_d$  – относительная скорость частицы, м/с.

В случае прямых радиальных лопастей относительная скорость движения материала:

$$v_d = v_r = \dot{r}. \quad (9)$$

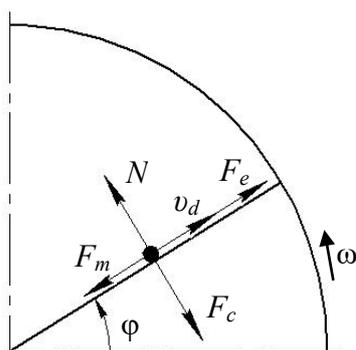


Рисунок 2. – Силовая схема

Скорость движения вдоль лопасти  $\dot{r}$  определена ранее [8] по уравнению относительного движения, которое в векторной форме записывается:

$$m\vec{a}_d = \vec{F}_m + \vec{F}_e + \vec{F}_c, \quad (10)$$

где  $a_d$  – ускорение относительного движения, м/с<sup>2</sup>;

$F_m$  – сила трения частиц по лопасти, Н;

$F_e$  и  $F_c$  – инерционные силы переносная (центробежная) и кориолисова, Н.

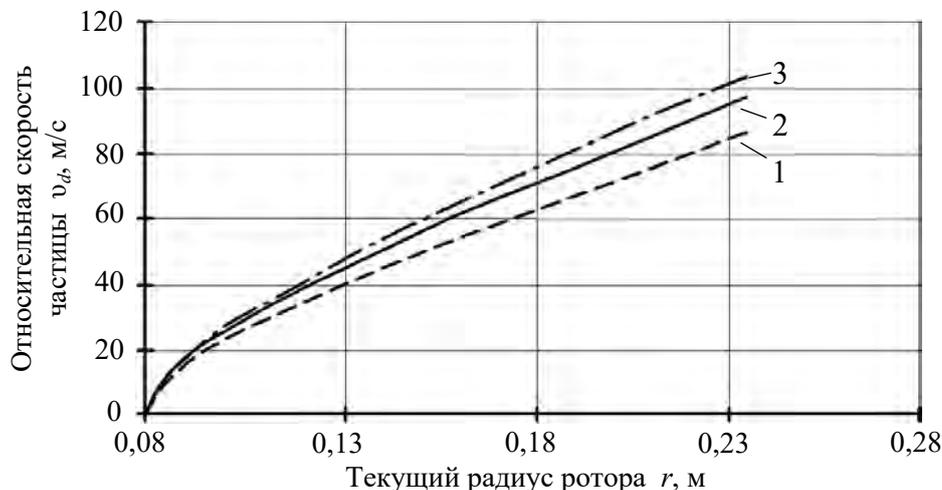
При движении частиц вдоль лопасти угловое перемещение отсутствует и уравнение относительного движения приобретает вид:

$$\dot{r} = \omega^2 r - 2f\omega\dot{r}, \quad (11)$$

где  $f$  – коэффициент трения частиц о лопасть.

Решение этого дифференциального уравнения с помощью пакета программ Mathcad позволило определить относительную скорость движения частиц вдоль лопасти [8].

По результатам расчетов для ударно-центробежных мельниц с ротором, снабженным прямыми радиальными лопастями, получена графическая зависимость  $\dot{r} = f(r)$  при разных угловых скоростях, рисунок 3.



1 –  $\omega = 390$  рад/с; 2 –  $\omega = 440$  рад/с; 3 –  $\omega = 470$  рад/с

Рисунок 3. – Зависимость относительной скорости частицы от текущего радиуса ротора  $r$

Из графика видно, что на стабилизированном участке относительная скорость линейно изменяется от угловой скорости ротора. По среднему значению относительной скорости можно рассчитать силу давления частицы на лопасти. После небольших преобразований расчетная формула (8) для нее примем вид:

$$F = \frac{4}{3} \pi r_0^3 \rho \cdot 2\omega \dot{r}_{cp}. \quad (12)$$

Довольно сложен и неоднозначен вопрос об определении глубины лунки при внедрении зерна в поверхность лопасти. В работе [6] сделан анализ различных расчетных зависимостей. Автор данной работы также провел пробные расчеты по некоторым из них и пришел к выводу, что наиболее адекватной, учитывающей максимальное количество факторов, является формула Герца, представленная в виде:

$$h = \left( \frac{3F(1-\nu^2)}{4E} \right)^{\frac{2}{3}} r_0^{-\frac{1}{3}}, \quad (13)$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона;

$E$  – модуль упругости.

Далее из геометрии известно, что угол сектора ограничивающего сегмент заглубления зерна:

$$\alpha = 2 \arccos \frac{r_0 - h}{r_0}, \quad (14)$$

а площадь сегмента заглубления эквивалентна сечению срезаемого металла:

$$S_m = \frac{1}{2} r_0^2 (\alpha - \sin \alpha), \quad (15)$$

где  $\alpha$  – угол сектора, рад.

Получив расчетную зависимость для площади сегмента срезаемого металла, можно реализовать основную задачу работы по определению интенсивности абразивного износа по формуле (6).

Расчет проводился для ударно-центробежной мельницы с радиусом ротора 460 мм и производительностью по кварцевому песку до 300 кг/ч. Предполагалось, что лопасти ротора изготовлены из углеродистой стали Ст3. Размер частиц песка принимался 200 мкм. Все расчеты проводились при трех угловых скоростях ротора – 390 рад/с; 440 рад/с; 470 рад/с.

Результаты расчета представлены в виде графической зависимости, рисунок 4.

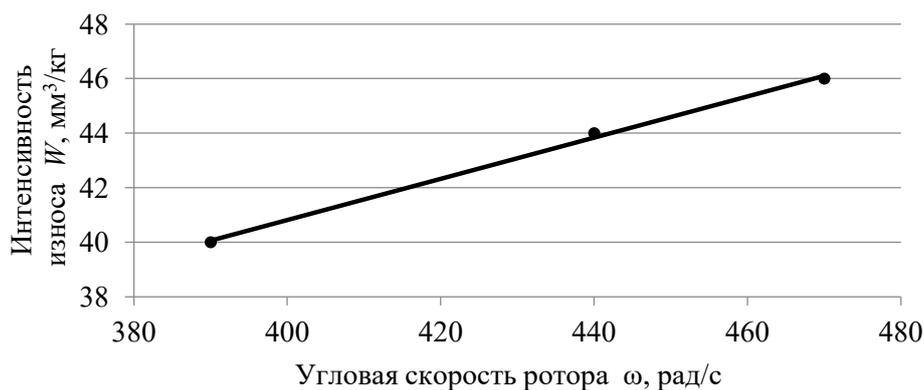


Рисунок 4. – Зависимость интенсивности износа от угловой скорости ротора

Результаты подтвердили адекватность физической модели и методики расчета износа на ее основе. В исследуемом диапазоне величина интенсивности износа повышается с увеличением угловой скорости, но это повышение незначительно. Ее численные значения вполне реальны, согласуются с практикой. Но все же следует отметить, что экспериментальные данные по износу [9], полученные в абсолютно идентичных условиях, несколько выше. Это связано, скорее всего, с имеющим место в данной конструкции мельницы ударно-абразивным износом. Именно на теоретическое осмысление этого процесса и будет направлена дальнейшая работа.

### Выводы

Составлена физическая модель истирающего воздействия абразивного измельчаемого материала на лопасти ротора центробежной мельницы. Разработаны ее математическое описание и алгоритм расчета интенсивности износа. Проведена апробация предположенной методики, получены реальные значения величины износа лопастей ротора. Работоспособность методики указывает на то, что ее можно использовать не только для мельниц, но для любых быстро вращающихся агрегатов, например, вентиляторов.

### Список использованных источников

1. Клейс, И.Р. Износостойкость элементов измельчителей ударного действия / И.Р. Клейс, Х.Х. Ууэмыйс. – М.: Машиностроение, 1986. – 286 с.

2. Beckmann, G. Analytical model of the blast wear intensity of metals based on a general arrangement for abrasive wear / G. Beckmann, I. Gotzmann // *Wear*. – 1981. – Vol. 73. – P. 325-353.
3. Бароха, Э.Л. Центробежные дробилки и мельницы ударного типа / Э.Л. Бароха, В.В. Воробьев, А.В. Горобец // *Центробежная техника – высокие технологии: материалы 3-й Междунар. науч.-технич. конф.*, Минск, 9-11 сент. 2008 г. / ОАО «НПО Центр». – Минск, 2008. – С. 5-15.
4. Байкалов, А.К. Введение в теорию шлифования материалов / А.К. Байкалов. – Киев: Навукова думка, 1978. – 207 с.
5. Димов, Ю.В. Обработка деталей свободным абразивом / Ю.В. Димов. – Иркутск: Изд. ИрГТУ, 2000. – 293 с.
6. Ходаков, Г.С. Механизм абразивного шлифования стекла / Г.С. Ходаков // *Оптика-механическая промышленность*. – 1985. – № 5. – С. 31-36.
7. Генералов, М.Б. Механика твердых дисперсных сред в процессах химической технологии / М.Б. Генералов. – Калуга: Н. Бочкарева, 2002. – 592 с.
8. Влияние конструктивных особенностей ротора на скорость измельчаемого материала в центробежно-ударных дробилках / П.Е. Вайтехович [и др.] // *Горная механика и машиностроение*. – 2017. – № 2. – С. 54-63.
9. Таболич, А.В. Конструктивные возможности повышения износостойкости ускорителей центробежно-ударных мельниц / А.В. Таболич, С.Н. Бондаренко // *Горная механика и машиностроение*. – 2016. – № 2. – С. 71-77.

---

**Vaitekhovich P.E.**

**Model of grinding action of the material to be crushed on the rotor blades of the impact-centrifugal mill**

*The article suggests a model of abrasive action of the particles of the material to be crushed on the rotor blades of a shock-centrifugal mill and a method for calculating the volume intensity of wear. For its realization, the relative velocity, the pressure force and the penetration depth of the particles into the surface of the blades are determined. Dependence of the wear rate on the angular velocity of the rotor is obtained. It is shown that its calculated values are somewhat less than the experimental ones. This indicates the need to take shock-abrasive wear into account.*

*Keywords: mill, wear, particle, blade, relative velocity, pressure force, hole depth, cut metal.*

Поступила в редакцию 27.10.2017 г.

УДК 621.83.06:004

**КОМПЬЮТЕРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СБОРКОЙ ГИПОИДНЫХ ПЕРЕДАЧ**

Пашкевич В.М. (ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет», г. Могилев, Беларусь)

*Приведены сведения о методике управления сборкой гипоидных передач, базирующейся на численном анализе функции ее кинематической погрешности, включающем использование сжимающих функций, а также оконной процедуры вычисления центрального момента распределения.*

Ключевые слова: *гипоидная передача, управление сборкой, кинематическая погрешность, сжимающая функция, центральный момент распределения.*

**Введение**

Гипоидная (гиперблоидная) передача – часто используемый на практике вид винтовой зубчатой передачи, осуществляемой коническими колесами с косыми или криволинейными зубьями со скрещивающимися осями. Преимущества данного типа передач заключаются в повышенной нагрузочной способности, значительно превышающей нагрузочную способность передач винтовыми колесами, а также аналогичную способность конических передач. Другие преимущества передач данного типа состоят в повышенной плавности хода и бесшумности работы.

Учитывая данные обстоятельства, гипоидные передачи часто используют в машиностроении в качестве главных передач приводов ведущих мостов автомобилей, локомотивов. В силу того, что в зацеплении одновременно находится несколько пар зубьев, гипоидные передачи применяются также в механизмах высокой точности, например, в качестве делительных передач прецизионных зуборезных станков. В то же время, недостатком гипоидных передач является повышенная опасность заеданий, связанная с наличием больших удельных нагрузок между зубьями, а также увеличенной продолжительностью работы силы трения.

Для достижения нормального зацепления важно обеспечить совпадение у обоих зубчатых колес вершин делительных конусов в одной точке, а также затылков зубьев. Регулируют при этом зацепление зубьев осевым сдвигом валов вместе с зубчатыми колесами. Требуемое положение зубчатых колес фиксируется постановкой регулировочных прокладок или колец [1].

Качество сборки передач контролируют методом нанесения краски. Погрешности в зацеплении оценивают по размерам и расположению пятна контакта на зубьях сопряженного колеса. Несмотря на очевидную наглядность и простоту метода, он обладает существенными недостатками, связанными с низкой точностью и достоверностью результатов, а также низкой производительностью. Так, например, величина пятна контакта, соответствующего суммарной площади участков, на которых краска под действием нагрузки выдавливается с боковой поверхности зубьев, существенным образом зависит от вязкости краски, размера зерен ее пигментной фракции, а также характеристик поверхностного натяжения и адгезии краски с поверхностью зубьев. Оказывает влияние на точность метода и скорость вращения звеньев передачи, увлекающих краску за собой по поверхности зубьев за счет сил поверхностного натяжения.

Другим недостатком метода является субъективность оценки оператором величины пятна контакта, непостоянной для каждого зуба колеса и являющейся в этой связи оценкой, субъективно усредненной по всей совокупности зубьев.

Производительность метода также низка. Так, использование метода краски, если результат не достигнут, подразумевает ее удаление с поверхностей зубьев, затем дальнейшую регулировку передачи, повторное нанесение краски, оценку пятна контакта и т.д. до достижения положительного результата.

Приведенные обстоятельства показывают, что рекомендуемый метод контроля сборки является не только малопродуктивным, субъективным, но и при современном уровне развития контрольно-измерительной техники – устаревшим. Альтернативу ему может составить метод, связанный с компьютерным управлением процессом сборки на основе математического анализа сигнала кинематической погрешности передачи.

### Основная часть

В монографии [2] приведены сведения, показывающие, что кинематическая погрешность является чувствительным комплексным показателем качества передачи. Практически все наиболее значимые погрешности изготовления и сборки механических передач оказывают влияние на отдельные спектральные составляющие кинематической погрешности.

Следует отметить, что подход, связанный с приведением всей совокупности погрешностей зубчатых колес к функционально действующей ошибке, впервые был предложен профессором Н.А. Калашниковым, который приводил погрешности зубчатых колес к единому параметру – изменению мгновенного радиуса основной окружности в зависимости от угла поворота колеса. Дальнейшее развитие данная идея получила в трудах Б.Л. Тайца [3].

При нарушении точности сборки возникают погрешности в основном шаге, которые в совокупности с погрешностями профиля зубьев колес и погрешностью направления зубьев относительно образующей делительного конуса вызывают динамические нагрузки на зубья (удары) при их входе в зацепление.

Если шаг ведущего колеса с учетом деформации зубьев меньше шага ведомого, то ножка ведущего зуба ударяет по кромке зуба ведомого колеса. Такой удар условно называют кромочным. Если шаг ведущего колеса с учетом деформации зубьев превышает шаг ведомого, то пара зубьев входит в контакт уже после размыкания контакта предшествующих зубьев. Такой удар условно называют срединным.

Кромочный удар возможен при любых значениях погрешности основного шага  $\Delta_0$ , в том числе – и в точной передаче (при  $\Delta_0 = 0$ ), так как при действительных погрешностях  $\Delta_r$ , заключенных в пределах  $-\Delta_0 \leq \Delta_r \leq \Delta_0$ , всегда возможны случаи, когда шаг ведущего колеса с учетом деформации зубьев будет меньше шага ведомого. Полный срединный удар возможен только в передачах при коэффициенте перекрытия  $\Psi_c > 1$ , когда ошибка  $\Delta_0$  превышает упругую деформацию зубьев [3].

Дифференциальное уравнение, описывающее ударное взаимодействие зубчатых колес, имеет вид [4]:

$$\frac{d^2 x_3}{dt^2} = -\frac{F}{\mu_{np}}, \quad (1)$$

где  $F$  – сила, нормальная к контактирующим поверхностям зубьев;

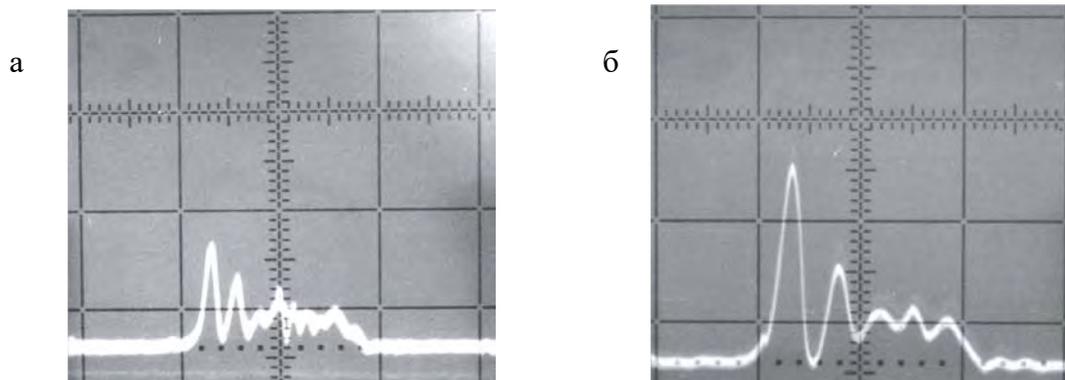
$$\mu_{np} \text{ – приведенная масса колес передачи, } \mu_{np} = \frac{\mu_1 \mu_2}{\mu_1 + \mu_2};$$

$\mu_1, \mu_2$  – массы, приведенные к радиусам основных конусов, соответственно, ведущего и ведомого колеса;

$x_3$  – сближение зубьев вследствие местного сжатия в зоне контакта в момент времени  $t$ ;

$\frac{d^2x_3}{dt^2}$  – ускорения зубьев в их относительном движении в процессе удара.

Решение уравнения (1) показывает, что в передаче при сопряжении зубьев реализуются не только первый, но и последующие максимумы усилий. Результаты решения уравнения (1) были проверены путем проведения тензометрирования и испытания зубчатых колес на стенде ОИМ НАН Беларуси. На рисунке 1 приведены осциллограммы нагруженности зуба ведомого колеса при частоте вращения ведущей шестерни: при  $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$  (а), при  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$  (б) и вращающем моменте  $120 \text{ Н}\cdot\text{м}$ . Развертка луща осциллографа на рисунке 1а равна  $0,001 \text{ с/см}$ , а на рисунке 1б –  $0,0005 \text{ с/см}$  [4].



а – при  $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$ ; б – при  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$

Рисунок 1. – Ударный импульс на осциллограмме нагруженности зуба

Первая полуволна нагруженности зуба представляет собой ударный импульс, возникающий при входе зуба в зацепление. Последующие изменения нагруженности зуба соответствуют динамическому колебательному процессу масс зубчатых колес.

Экспериментальные исследования кинематической погрешности передач показывают, что ее форма в процессе сопряжения зубьев очевидно коррелирует с формой решения уравнения (1), поэтому для управления процессом сборки передач может быть использована описанная ниже процедура временного анализа сигнала кинематической погрешности, связанная с выделением областей, соответствующих ударным явлениям в зацеплении [5].

Исследования кинематических погрешностей велись на стенде (рисунок 2а), который содержит исследуемую гипоидную передачу 1 с приводным электродвигателем 2 и устройством нагружения 3, преобразователь угловых перемещений ВЕ-178 (на рисунке закрыт задней частью передачи; виден на рисунке 2б), подключаемый к устройству 4 сбора данных. Индикатор часового типа 5 с ценой деления  $0,01 \text{ мм}$  производит отсчет осевых перемещений ведомого колеса. Для этого необходимо с помощью специальных ключей 6 и 7 (рисунок 2в) переместить фасонные гайки, удерживающие ведомое колесо.

Поиск рекомендуемого положения колес гипоидной передачи сводится к их взаимному перемещению и контролю при этом сигнала ее кинематической погрешности. Требуемое положение колес будет достигнуто в том случае, если в сигнале кинематической погрешности не будут выявлены области, соответствующие ударам в зацеплении. Так как ударные явления носят нестационарный характер, для их выделения не могут быть использованы спектральные методы, базирующиеся на предположении о перио-

дическом характере изучаемой функции. Выделение ударов в автоматизированном режиме может быть построено на использовании временных методов, применяющих сжимающие функции, обеспечивающие выделение участков сигнала кинематической погрешности, на которых функция имеет тенденцию к быстрым пульсациям. С этой целью можно использовать следующую процедуру, связанную с адаптивным ослаблением выбросов. Базируется она на представлении о том, что величина приращения функции кинематической погрешности наиболее велика как раз на участках выбросов, соответствующих ударам в зацеплении.

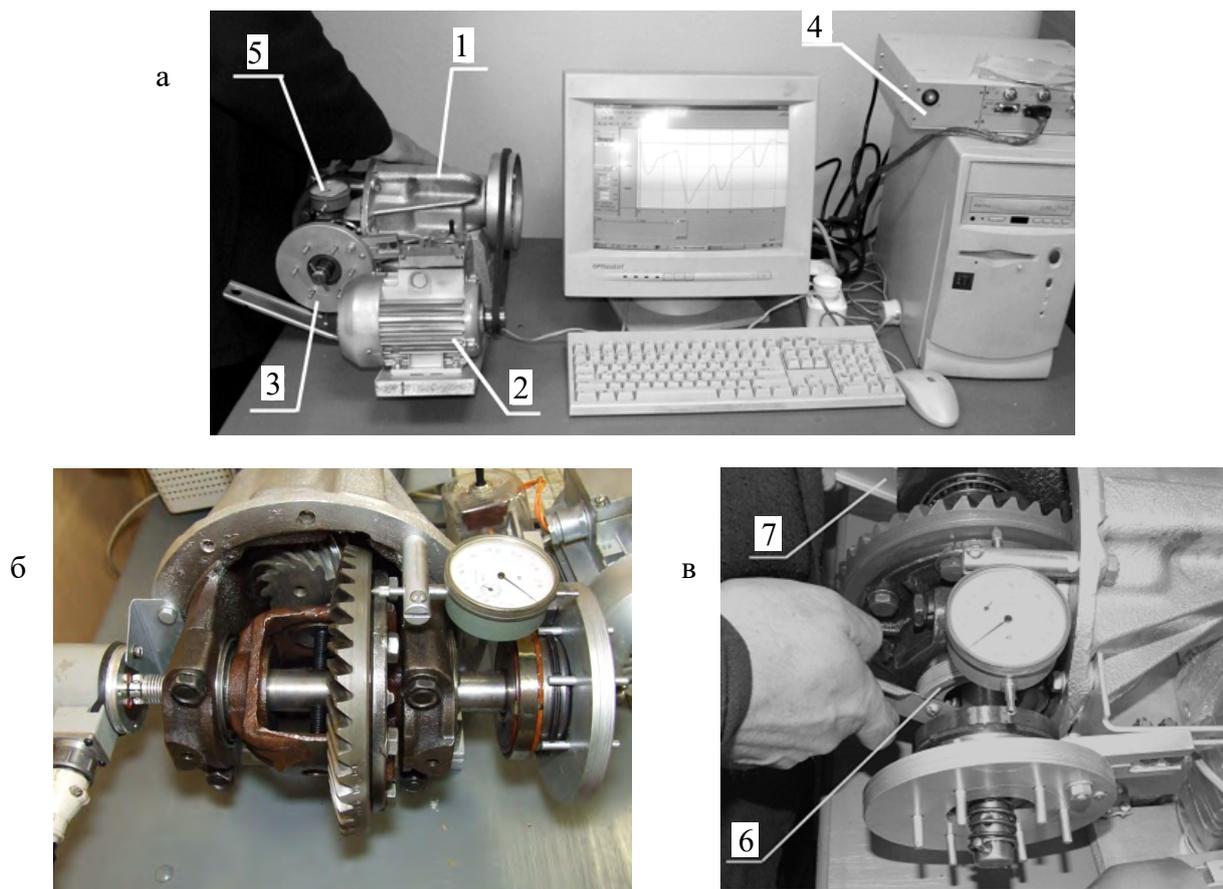


Рисунок 2. – Экспериментальный стенд для управления сборкой

На первом этапе в сигнале экспериментальной кинематической погрешности  $y_i$  подавляются участки, соответствующие выбросам, (выделяется тренд функции  $y'_i$ ). На втором этапе выделяются области, соответствующие ударам в зацеплении за счет нахождения разности между исходным сигналом и его трендом.

Тренд сигнала после устранения выбросов описывается в этом случае уравнением:

$$y'_i = y'_{i-1} + (y_i - y'_{i-1}) \cdot f(y_i - y'_{i-1}), \quad (2)$$

где  $f(y_i - y'_{i-1})$  – сжимающая функция, значение которой зависит от приращения функции кинематической погрешности относительно ее тренда, т.е.  $y_i - y'_{i-1}$ ;

$i$  – номер отчета сигнала.

В качестве таких функций могут быть использованы: показательная функция (3) и модифицированная функция Гаусса (4):

$$f(y_i) = \left(1 - \left|\frac{y_i - y'_i}{S}\right|\right)^n; \quad (3)$$

$$f(y_i) = \exp\left(-k \left|\frac{y_i - y'_i}{S}\right|^2\right), \quad (4)$$

где  $S$  – среднеквадратическое отклонение сигнала;

$k$  – положительный коэффициент, характеризующий степень сжатия выброса;

$n$  – показатель степени, определяемый эмпирически.

Для эффективного применения процедуры необходимо подобрать величину коэффициентов ослабления  $k$  или  $n$ . Данная процедура реализуется достаточно просто, причем вариации коэффициентов влияют на результат в небольшой степени.

Результат использования сжимающей функции к кинематической погрешности  $\Delta\varphi$  представлен на рисунке 3.

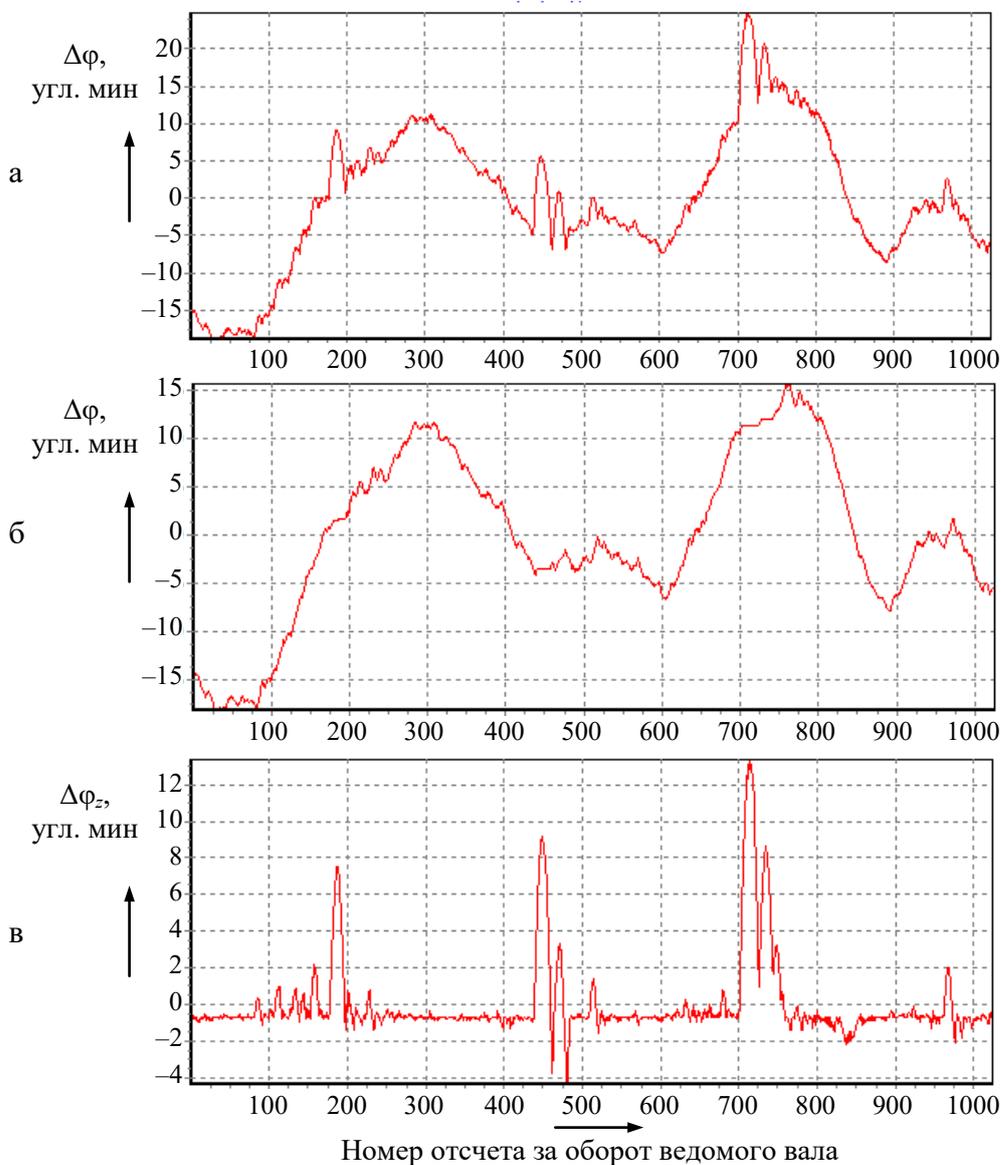


Рисунок 3. – Результаты применения сжимающей функции

На рисунке 3а приведен экспериментальный график кинематической погрешности гипоидной передачи (в угловых минутах) при наличии ударов, а на рисунке 3б – тренд функции, выделенный после применения сжимающей функции Гаусса. На рисунке 3в показан разностный сигнал между записями 3а и 3б, который представляет собой выделенную нестационарную составляющую кинематической погрешности, соответствующую ударам в зацеплении (зубцовая составляющая с ударами). Здесь и далее по горизонтальной оси отложены номера отсчетов сигнала кинематической погрешности в пределах одного оборота ведомого вала.

Следующей задачей после выполнения описанной выше процедуры предварительной обработки кинематической погрешности является автоматическое распознавание в ее сигнале кромочного удара. На графике зубцовой составляющей кинематической погрешности такой удар характеризуется резким скачком сигнала, носящим периодический (колебательный) характер, что хорошо заметно на рисунке 3в. Однако амплитуды таких колебаний могут заметно отличаться друг от друга в зависимости от входящей в зацепление пары зубьев, а также могут иметь как положительную, так и отрицательную величину. Эти обстоятельства не позволяют сформировать четкий критерий для распознавания удара по зубцовой составляющей.

Выделить такие пульсации, однако, можно на основе их свойства заметно отклоняться от среднего значения сигнала. В этой связи для распознавания удара можно использовать параметр центрального момента сигнала, оценивающий величину усредненного абсолютного отклонения сигнала от его среднего значения. Очевидно, что в местах возникновения удара значение центрального момента также резко увеличится (в 3...5 раз и более) относительно его среднего значения. Этот критерий и может использоваться для распознавания ударных явлений в передаче.

Центральный момент  $n$ -ого порядка будем рассчитывать по формуле [6]:

$$\mu_n = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - \bar{y}|^n, \quad (5)$$

где  $y_i$  –  $i$ -й отсчет зубцовой составляющей;

$\bar{y}$  – среднее значение выборки;

$N$  – объем выборки.

Процедура расчета центрального момента требует также определения объема выборки  $N$ , в пределах которой удар может быть обнаружен. Так как процесс удара происходит в течение времени, не превышающего промежутка, соответствующего пересопряжению двух зубьев, то ширина соответствующего временного окна не должна быть меньше количества отсчетов, равного

$$N = \frac{M}{z_2}, \quad (6)$$

где  $M$  – количество отсчетов устройства сбора данных за оборот ведомого вала;

$z_2$  – количество зубьев ведомого звена.

Таким образом, расчет центрального момента осуществляется в форме скользящей (оконной) процедуры с перемещением окна от начала записи кинематической погрешности к ее концу с единичным шагом.

Рассмотрим влияние степени  $n$  центрального момента на чувствительность процедуры выделения ударов.

На рисунке 4 представлены экспериментальная запись зубцовой составляющей кинематической погрешности, а также ее центральные моменты 2, 3, 5 и 10-го порядков.

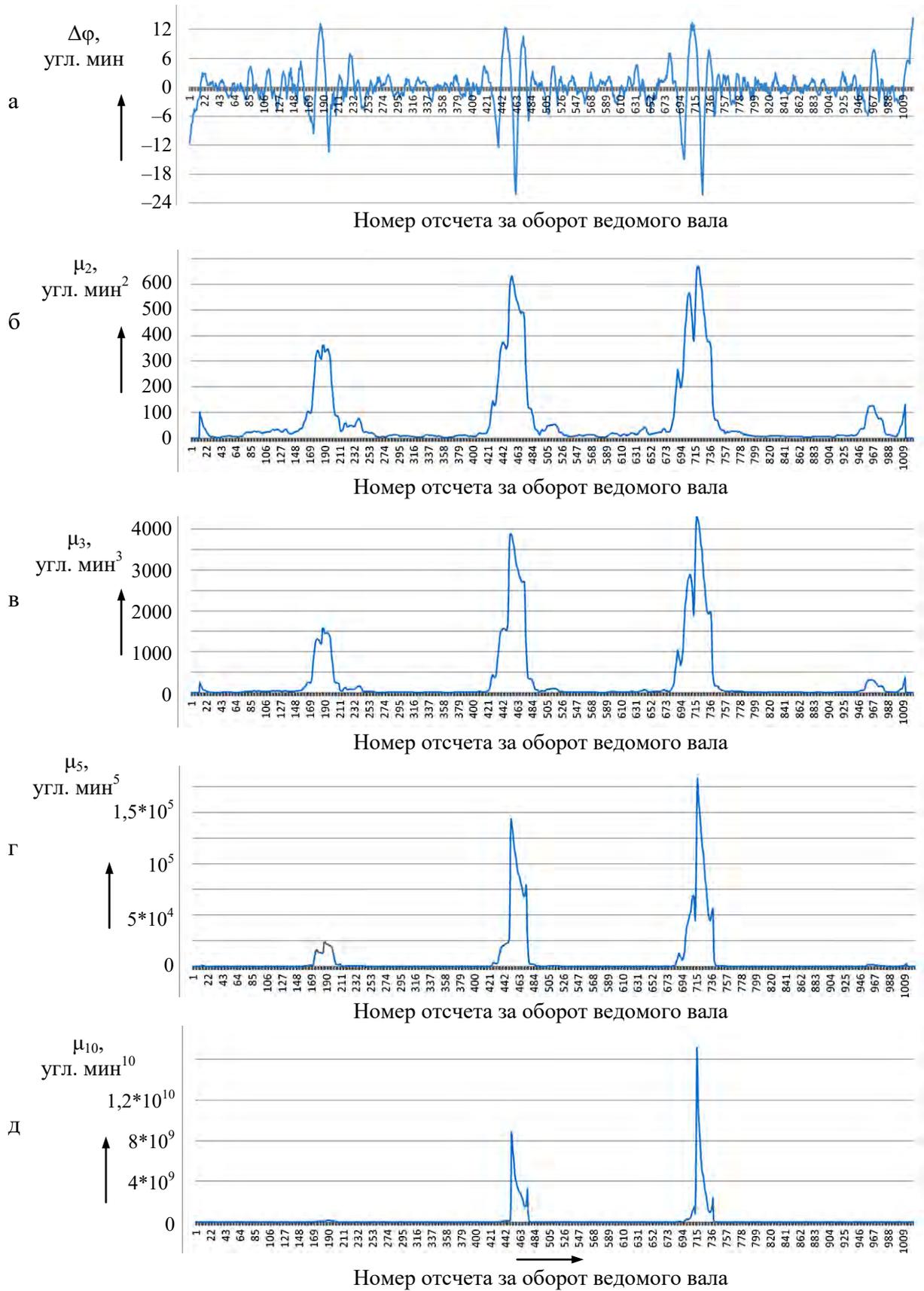


Рисунок 4. – Графики зубцовой составляющей и ее центральных моментов 2, 3, 5 и 10-го порядков

Видно, что наилучшее качество распознавания обеспечивают центральные моменты 2...4-го порядка (рисунок 4б). Дальнейшее увеличение их степени приводит к тому, что моменты, соответствующие ударам небольшой амплитуды, оказываются заметно (на несколько порядков) меньше, чем моменты, соответствующие ударам незначительно большей амплитуды, в связи с чем они подавляются и не распознаются.

В этой связи в экспериментальных исследованиях мы использовали центральные моменты 3-го порядка. Несколько худшие результаты дают центральные моменты 2-го порядка (дисперсия сигнала), а также момент 4-го порядка.

Представленный выше способ распознавания ударных процессов в зацеплении на основе временного анализа кинематической погрешности был экспериментально проверен на стенде (рисунок 2). При этом выполнялась следующая последовательность действий.

Колесо выставлялось с помощью регулировочных гаек в крайнее положение; индикатор часового типа, измеряющий перемещение колеса, выставлялся на ноль. Далее производилась запись кинематической погрешности, выделение с помощью функции Гаусса сигнала с ударами, а затем расчет центрального момента 3-го порядка. При распознавании ударов программный комплекс выдавал соответствующее сообщение. Далее колесо снова с шагом 0,05 мм перемещалось, после чего описанные измерения и расчет повторялись до тех пор, пока удары в зацеплении не распознавались или имели наименьшую величину центрального момента.

Результаты экспериментальных исследований представлены на рисунках 5-7.

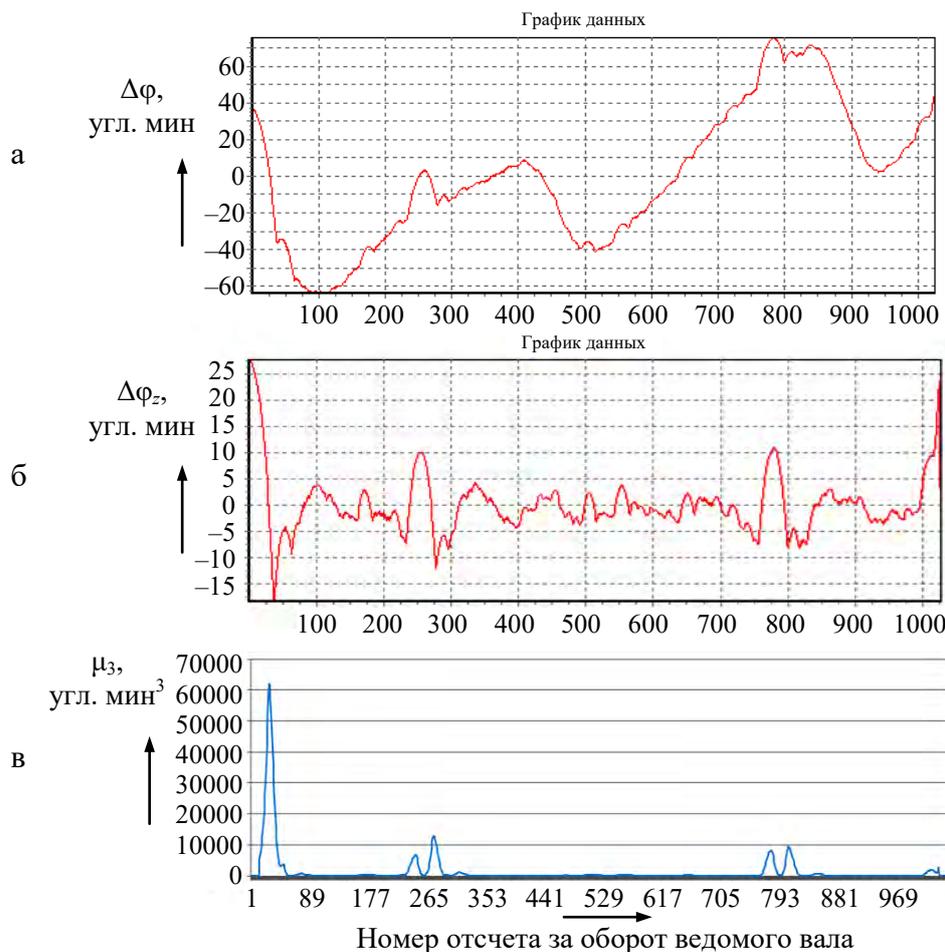


Рисунок 5. – Крайнее положение колеса

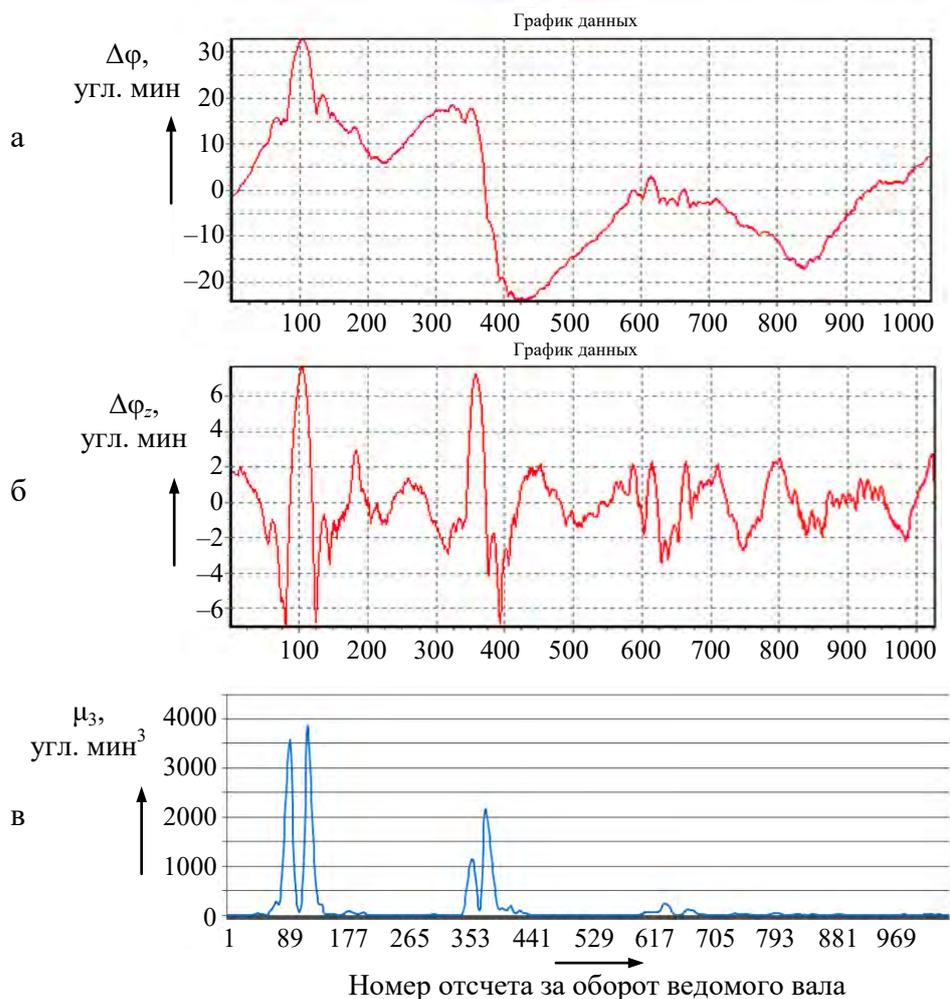


Рисунок 6. – Смещение колеса на 0,5 мм от крайнего положения

Части «а» рисунков представляют запись кинематической погрешности  $\Delta\varphi$ , части «б» – их зубцовые составляющие  $\Delta\varphi_z$ , части «в» – центральные моменты 3-го порядка  $\mu_3$ .

Программным комплексом было установлено наличие ударных явлений для положений, соответствующих рисункам 5 и 6. В положении, соответствующем смещению колеса на 1,5 мм от крайнего положения (рисунок 7), удары распознаны не были. Данное положение соответствовало боковому зазору гипоидной передачи в пределах допуска и составило около 0,25 мм. Последующее нанесение краски на боковые поверхности зубьев подтвердило корректность регулировки.

Необходимо, однако, отметить, что причинами возникновения ударных явлений может быть целый ряд причин (износ зацепления, наличие местных дефектов на боковой поверхности зубьев или низкое качество их шлифования, отсутствие преднатяга в подшипниках и т.п.), наличие которых не позволит обеспечить правильную регулировку передачи в принципе, впрочем, как и использование любых других методов.

В этой связи описанный способ управления сборкой может расцениваться как экспресс-метод, позволяющий относительно быстро выставить колеса в положение, близкое к рекомендуемому. Проверка корректности определения положения колес может вестись далее, в том числе, с помощью метода краски.

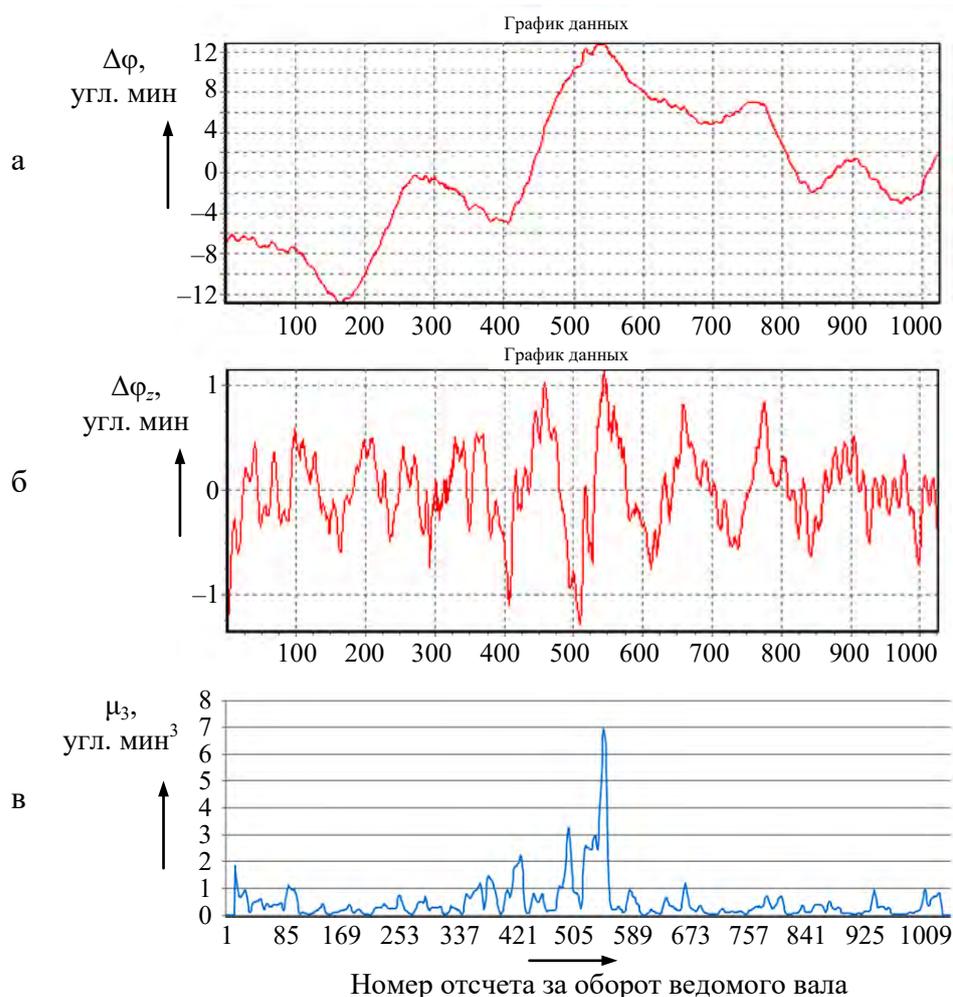


Рисунок 7. – Смещение колеса на 1,5 мм от крайнего положения

Определенным недостатком способа является необходимость экспериментальной настройки алгоритма распознавания для передач различных типоразмеров (определение коэффициента ослабления функции Гаусса, порядка центрального момента, пороговой величины момента для выявления удара).

### Выводы

1. Показано, что функция кинематической погрешности может использоваться в качестве параметра для управления сборкой передач регулируемых типов (гипоидных передач).
2. Предложен алгоритм цифровой обработки сигнала кинематической погрешности, основанный на применении сжимающих функций и вычислении центральных моментов распределения, позволяющий распознавать наличие ударных процессов в зацеплении.
3. Экспериментально подтверждена эффективность компьютерного метода управления сборкой по параметру кинематической погрешности.

---

**Список использованных источников**

1. Рахматулин, М.Д. Технология ремонта тепловозов / М.Д. Рахматулин. – М.: Транспорт, 1983. – 447 с.
2. Повышение точности механических передач на основе компьютерного моделирования и использования технологий искусственного интеллекта: монография / В.М. Пашкевич [и др.]. – Могилев: ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет», 2011. – 139 с.
3. Тайц, Б.А. Точность и контроль зубчатых передач / Б.А. Тайц, Н.Н. Марков. – Л.: Машиностроение, 1978. – 136 с.
4. Ишин, Н.Н. Определение параметров ударного импульса в зацеплении прямозубых цилиндрических колес с учетом упругости валов и подшипников / Н.Н. Ишин, А.М. Гоман, А.С. Скороходов // Механика машин, механизмов и материалов. – 2012. – № 2 (19). – С. 37-40.
5. Пашкевич, В.М. Управление сборкой гипоидных передач на основе анализа их кинематической погрешности / В.М. Пашкевич, М.Н. Миронова, С.Л. Слепцов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 14-15 апр. 2016 г. / ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет»; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2016. – С. 41.
6. Крамер, Г. Математические методы статистики / Г. Крамер. – 2-е изд. – М.: Мир, 1975. – 648 с.

---

**Pashkevich V.M.**

**Computer control of assembly of hypoid gears**

*The information is given on control procedure of assembly of hypoid gears based on a numerical analysis of its kinematic error function, including the use of compression functions, as well as the window procedure for calculation of the distribution central moment.*

*Keywords: hypoid gears, assembly control, kinematic error, compressive function, distribution central moment.*

Поступила в редакцию 05.10.2017 г.

УДК 621.65.01

## О ВЛИЯНИИ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ СИЛЫ НА РАБОТУ РАДИАЛЬНОЙ ТУРБИНЫ ПРИ ВВОДЕ ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА

Павлечко В.Н. (УО «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск, Беларусь)

*Установлена взаимосвязь отдельных параметров радиальной турбины от направления потока рабочей среды. Скорость движения среды между лопастями под влиянием центробежной силы и создаваемое ею давление учитываются не напрямую, а через другие соответствующие показатели. Выведены формулы для определения скоростей движения среды и лопастей турбины, а также давления, создаваемого средой на лопасти колеса, в зависимости от угла наклона лопастей и от направления движения среды. Приведены графические зависимости отношений скоростей движения среды в межлопастном пространстве к начальной скорости среды и к окружной скорости турбины, а также отношения давлений от углов наклона лопастей и потока среды.*

Ключевые слова: радиальная турбина, угол наклона лопастей, направление потока, скорости среды, скорость турбины, давление среды, центробежная сила.

### Введение

При анализе параметров центробежной машины общепринятым является уравнение Эйлера [1, 2], согласно которому давление, создаваемое средой на лопасти, равно произведению плотности среды на окружную скорость турбины и на тангенциальную скорость среды. В работе [3] проведен анализ сил, возникающих при радиальном вводе рабочей среды, на основании которого выведены формулы для расчета скоростей движения среды и лопасти, а также давления среды на лопасть в различных направлениях. Полученные зависимости дополняют уравнение Эйлера потерями давления на преодоление сопротивления лопасти при движении потока в радиальном направлении, а также давлением, создаваемым центробежной силой.

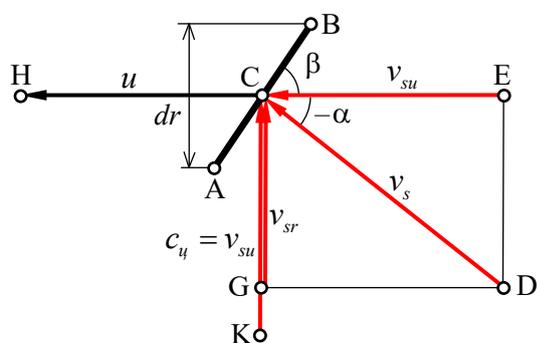
При закручивании входного потока перед лопастями радиальной турбины среда вводится в межлопастное пространство одновременно радиально и тангенциально. В работе [4] рассмотрено влияние закрученного потока среды, начальная скорость  $v_s$  которого разделена на тангенциальную  $v_{su}$  и радиальную  $v_{sr}$  величины (рисунок 1). Эти составляющие скорости среды определяются выражениями:

$$v_{sr} = -v_s \sin \alpha ; \quad (1)$$

$$v_{su} = v_s \cos \alpha . \quad (2)$$

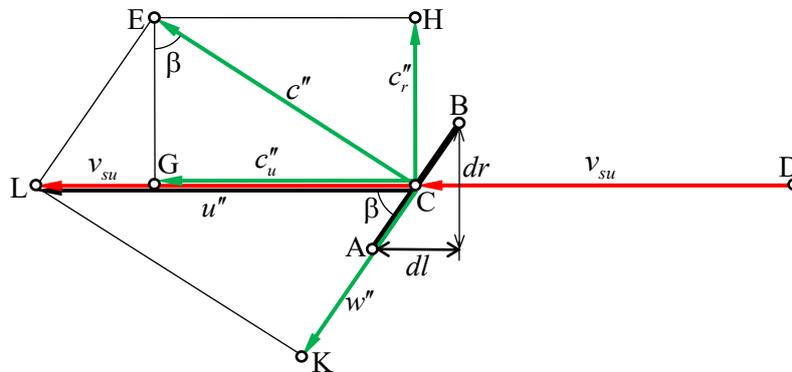
Для этой и последующих формул и рисунков условные обозначения расшифрованы в литературе [3, 4].

Отрицательная величина угла  $\alpha$  обусловлена тем, что он и угол  $\beta$  наклона лопасти отсчитываются в противоположные стороны от направления, обратного окружной скорости  $u$  (рисунок 1).



**Рисунок 1. – Составляющие скорости воздействия среды на элементарную площадку лопасти**

Скорости движения среды и участка лопасти от воздействия тангенциальной составляющей потока среды приведены на рисунке 2 [4].



**Рисунок 2. – Скорости движения элементарного объема среды и площадки под воздействием тангенциальной составляющей потока**

В результате анализа действующих на турбину сил выведены зависимости для расчета скоростей движения среды и давлений среды на лопасть отдельно в радиальном и тангенциальном направлениях, а также их соответствующие результирующие величины. В частности, при тангенциальном вводе среды скорости ее движения в межлопастном пространстве в направлении, перпендикулярном плоскости лопасти, в тангенциальном, радиальном направлениях и вдоль лопасти, а также окружная скорость участка лопасти определяются по соответствующим формулам [3, 4]:

$$c'' = v_{su} \sin \beta ; \quad (3)$$

$$c_u'' = v_{su} \sin^2 \beta ; \quad (4)$$

$$c_r'' = v_{su} \sin \beta \cdot \cos \beta ; \quad (5)$$

$$w'' = v_{su} \cos \beta ; \quad (6)$$

$$u'' = v_{su} . \quad (7)$$

Давление среды на участок лопасти в направлении, перпендикулярном ее плоскости, в тангенциальном и радиальном направлениях рассчитываются по зависимостям [3, 4]:

$$P'' = \rho v_{su}^2 ; \quad (8)$$

$$P_u'' = \rho v_{su}^2 \sin^2 \beta ; \quad (9)$$

$$P_r'' = \rho v_{su}^2 \cos^2 \beta . \quad (10)$$

### Результаты исследований

В настоящей работе принята методология, несколько отличающаяся от применяемой ранее [3, 4] при определении влияния центробежной силы. Согласно ей, центробежная сила воздействует не только на среду, но и посредством среды на элементарный участок лопасти шириной  $b$  и высотой  $dr$  на расстоянии  $r$  от оси вращения. Поскольку тангенциальная скорость движения среды  $c_u''$  дополняется тангенциальной составляющей относительной скорости движения среды ( $w'' \cdot \sin \beta$ ), то суммарная величина скорости среды в тангенциальном направлении и, соответственно, ее скорость движения под действием центробежной силы принимаются равными начальной скорости среды, т.е.

$$c_u'' = v_{su}. \quad (11)$$

При радиальном вводе среды ее скорость  $c_u$  компенсируется тангенциальной составляющей относительной скорости ( $w \cdot \cos \beta$ ), и вращения среды не происходит. Кроме того, время воздействия всех рассматриваемых сил на элементарный участок лопасти принимается равным, например, величине, принятой в работе [4] для тангенциального ввода среды:

$$dt = dt'' = \frac{dr}{c_r''} = \frac{dr}{v_{su} \sin \beta \cos \beta}. \quad (12)$$

Рассмотрим влияние центробежной силы на работу турбины. На элементарный участок лопасти АВ воздействует поток среды под влиянием центробежной силы, движущейся со скоростью  $v_{su}$ . Сила среды определяется формулой (рисунок 3):

$$dF_{su} = \rho b dl v_{su}^2 = \rho b dr v_{su}^2 \frac{\cos \beta}{\sin \beta}. \quad (13)$$

В результате воздействия среды возникает реакция лопасти  $dF_u$ , направленная перпендикулярно плоскости ее участка АВ и представленная на рисунке 3 двумя составляющими:  $dF_{uu}$  и  $dF_{ur}$  (синие линии со стрелками). При равномерном вращении турбины отмеченные реакция лопасти уравниваются соответствующими силами, равными по величине и противоположными по направлению вышеуказанным силам (зеленые линии со стрелками на рисунке 3). Кроме того, на среду действует сила  $dF_{uw}$ , направленная вдоль плоскости лопасти. Перечисленные силы воздействия на лопасть геометрически взаимосвязаны и определяются зависимостями:

$$dF_u = dF_{su} \cos \beta = \rho b dr v_{su}^2 \frac{\cos^2 \beta}{\sin \beta}; \quad (14)$$

$$dF_{uu} = dF_u \sin \beta = \rho b dr v_{su}^2 \cos^2 \beta; \quad (15)$$

$$dF_{ur} = dF_u \cos \beta = \rho b dr v_{su}^2 \frac{\cos^3 \beta}{\sin \beta}. \quad (16)$$

Под действием перечисленных сил среда перемещается в направлении, перпендикулярном плоскости участка лопасти, со скоростью  $c_{u1}$ , в тангенциальном и радиальном направлениях – со скоростями  $c_{uu}$  и  $c_{ur}$ , вдоль лопасти – со скоростью  $w_u$  (рисунок 4). Участок лопасти при этом перемещается со скоростью  $u_u$ . Эти скорости, как и соответствующие силы, также геометрически взаимосвязаны. Выражения для расчета перечисленных скоростей определены в [3] и с учетом принятых обозначений имеют вид:

$$c_{u1} = v_{su} \cos \beta; \quad (17)$$

$$c_{uu} = v_{su} \sin \beta \cos \beta; \quad (18)$$

$$c_{ur} = v_{su} \cos^2 \beta; \quad (19)$$

$$w_u = v_{su} \sin \beta; \quad (20)$$

$$u_u = v_{su} \frac{\cos \beta}{\sin \beta}. \quad (21)$$

Поскольку среда перемещается вместе с лопастью в тангенциальном направлении со скоростью  $c_{uu}$ , а с тангенциальной составляющей относительной скорости дви-

жения среды ( $w_u \cdot \sin \beta$ ) движется в обратном направлении, то суммарная величина тангенциальной скорости среды в этом случае равна нулю, и дополнительная центробежная сила не возникает.

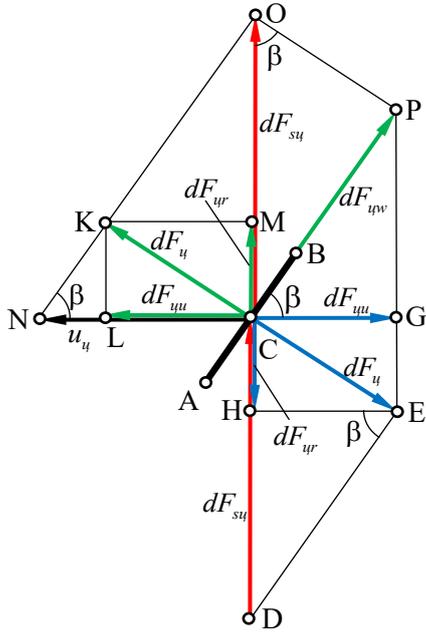


Рисунок 3. – Силы при воздействии центробежной силы на элементарную площадку

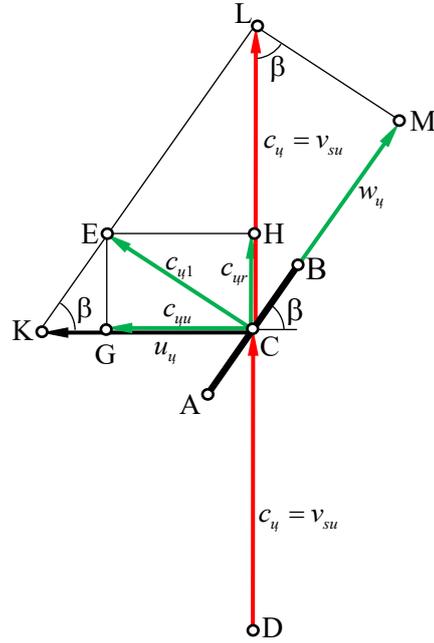


Рисунок 4. – Скорости движения элементарного объема среды и площадки под воздействием центробежной силы

Под влиянием действующих на лопасть сил за время  $dt$ , определяемое по формуле (12), среда перемещается на соответствующие расстояния:

$$ds_{su} = dt \cdot v_{su} = \frac{dr}{\sin \beta \cos \beta}; \quad (22)$$

$$ds_u = dt \cdot c_u = \frac{dr}{\sin \beta}; \quad (23)$$

$$ds_{uu} = dt \cdot c_{uu} = dr; \quad (24)$$

$$ds_{ur} = dt \cdot c_{ur} = dr \frac{\cos \beta}{\sin \beta}. \quad (25)$$

Энергия, передаваемая средой элементарной площадке лопасти в указанных выше направлениях, равна произведению сил в соответствии с формулами (13)-(16) на соответствующий путь перемещения из зависимостей (22)-(25):

$$dA_{su} = dF_{su} ds_{su} = \rho b (dr)^2 \frac{v_{su}^2}{\sin^2 \beta}; \quad (26)$$

$$dA_u = dF_u ds_u = \rho b (dr)^2 v_{su}^2 \frac{\cos^2 \beta}{\sin^2 \beta}; \quad (27)$$

$$dA_{uu} = dF_{uu} ds_{uu} = \rho b (dr)^2 v_{su}^2 \cos^2 \beta; \quad (28)$$

$$dA_{ur} = dF_{ur} ds_{ur} = \rho b (dr)^2 v_{su}^2 \frac{\cos^4 \beta}{\sin^2 \beta}. \quad (29)$$

Давление среды на лопасть равно энергии, отнесенной к единице перемещаемого элементарного объема среды, равного  $dV_u = b \cdot ds_{ui} \cdot ds_{ur}$ , и в указанных выше направлениях определяется соответствующими формулами:

$$P_{su} = \frac{dA_{su}}{dV_u} = \rho \frac{v_{su}^2}{\sin \beta \cos \beta}; \quad (30)$$

$$P_u = \frac{dA_u}{dV_u} = \rho v_{su}^2 \frac{\cos \beta}{\sin \beta}; \quad (31)$$

$$P_{ui} = \frac{dA_{ui}}{dV_{ui}} = \rho v_{su}^2 \sin \beta \cos \beta; \quad (32)$$

$$P_{ur} = \frac{dA_{ur}}{dV_{ur}} = \rho v_{su}^2 \frac{\cos^3 \beta}{\sin \beta}. \quad (33)$$

Определим влияние на турбину радиальной составляющей начальной скорости среды. При движении среды со скоростью  $v_{sr}$  она оказывает воздействие на элементарную площадку АВ силой  $dF'_{sr}$ , равной

$$dF'_{sr} = \rho b dl v_{sr}^2 = \rho b dr v_{sr}^2 \frac{\cos \beta}{\sin \beta}. \quad (34)$$

Возникающая реакция лопасти  $dF'$  направлена перпендикулярно плоскости площадки и представлена на рисунке 5 двумя составляющими  $dF'_u$  и  $dF'_r$  (синие линии со стрелками). Реакция лопасти уравнивается соответствующими силами, равными по величине и противоположными по направлению силам, перечисленным выше (зеленые линии со стрелками на рисунке 5). Кроме того, на среду действует сила  $dF'_w$ , направленная вдоль плоскости лопасти. Отмеченные силы воздействия на лопасть геометрически взаимосвязаны и определяются зависимостями:

$$dF' = dF'_{sr} \cos \beta = \rho b dr v_{sr}^2 \frac{\cos^2 \beta}{\sin \beta}; \quad (35)$$

$$dF'_u = dF' \sin \beta = \rho b dr v_{sr}^2 \cos^2 \beta; \quad (36)$$

$$dF'_r = dF' \cos \beta = \rho b dr v_{sr}^2 \frac{\cos^3 \beta}{\sin \beta}. \quad (37)$$

Перечисленные силы вызывают перемещение среды в направлении, перпендикулярном плоскости лопасти, со скоростью  $c'$ , в тангенциальном и радиальном направлениях – со скоростями соответственно  $c'_u$  и  $c'_r$ , вдоль лопасти – со скоростью  $w'$  (рисунки 6). Лопасть при этом перемещается со скоростью  $u'$ . Перечисленные скорости также геометрически взаимосвязаны. Выражения для определения отмеченных скоростей определены в [3, 4] и с учетом принятых обозначений имеют вид:

$$c' = v_{sr} \cos \beta; \quad (38)$$

$$c'_u = v_{sr} \sin \beta \cos \beta; \quad (39)$$

$$c'_r = v_{sr} \cos^2 \beta; \quad (40)$$

$$w' = v_{sr} \sin \beta; \quad (41)$$

$$u' = v_{sr} \frac{\cos \beta}{\sin \beta}. \quad (42)$$

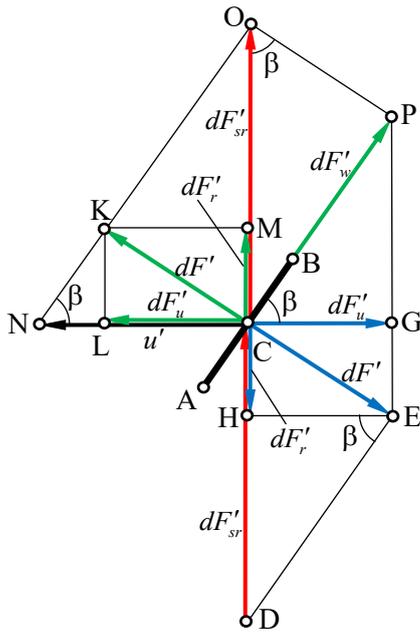


Рисунок 5. – Силы при воздействии радиальной составляющей потока на элементарную площадку

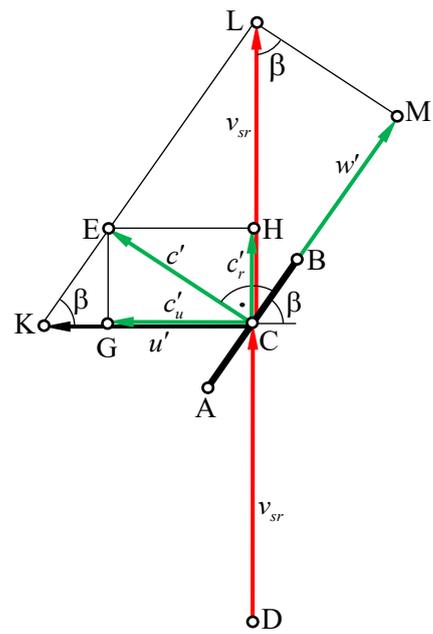


Рисунок 6. – Скорости движения элементарного объема среды и площадки под воздействием радиальной составляющей потока

Тангенциальная скорость движения среды  $c'_u$  уравновешивается противоположно направленной тангенциальной составляющей относительной скорости движения среды ( $w' \cdot \sin \beta$ ); суммарная величина тангенциальной скорости среды отсутствует, и центробежная сила не появляется.

За время  $dt$ , определяемое по формуле (12), среда перемещается на расстояния:

$$ds' = dt \cdot c' = \frac{v_{sr}}{v_{su}} \frac{dr}{\sin \beta}; \quad (43)$$

$$ds'_u = dt \cdot c'_u = \frac{v_{sr}}{v_{su}} dr; \quad (44)$$

$$ds'_r = dt \cdot c'_r = \frac{v_{sr}}{v_{su}} dr \frac{\cos \beta}{\sin \beta}. \quad (45)$$

Энергия, передаваемая средой элементарной площадке лопасти в указанных выше направлениях, равна произведению сил в соответствии с формулами (35)-(37) на соответствующие пути перемещения из зависимостей (43)-(45):

$$dA' = dF' ds' = \rho b (dr)^2 \frac{v_{sr}^3 \cos^2 \beta}{v_{su} \sin^2 \beta}; \quad (46)$$

$$dA'_u = dF'_u ds'_u = \rho b (dr)^2 \frac{v_{sr}^3}{v_{su}} \cos^2 \beta; \quad (47)$$

$$dA'_r = dF'_r ds'_r = \rho b (dr)^2 \frac{v_{sr}^3 \cos^4 \beta}{v_{su} \sin^2 \beta}. \quad (48)$$

Давление среды на лопасть определяется энергией, отнесенной к единице перемещаемого элементарного объема среды, равного  $dV' = b \cdot ds'_u \cdot ds'_r$ , и в указанных выше направлениях рассчитывается по формулам:

$$P' = \frac{dA'}{dV'} = \rho v_{su} v_{sr} \frac{\cos \beta}{\sin \beta}; \quad (49)$$

$$P'_u = \frac{dA'_u}{dV'} = \rho v_{su} v_{sr} \sin \beta \cos \beta; \quad (50)$$

$$P'_r = \frac{dA'_r}{dV'} = \rho v_{su} v_{sr} \frac{\cos^3 \beta}{\sin \beta}. \quad (51)$$

Результирующие значения параметров работы радиальной турбины при вводе тангенциальной и радиальной составляющих движения потока, а также при движении среды под действием центробежной силы выводятся сложением соответствующих величин. Положительные значения принимаются для скоростей, направление которых или их проекции совпадают с направлением окружной скорости турбины. Зависимости скоростей движения среды и турбины с учетом выражений (1) и (2), а также отрицательной величины угла  $\alpha$  имеют вид:

$$c = c'' + c' + c_{u1} = v_s [\sin(\beta - \alpha) + \cos \alpha \cos \beta]; \quad (52)$$

$$c_u = c''_u + c'_u + c_{uu} = v_s \sin \beta [\sin(\beta - \alpha) + \cos \alpha \cos \beta]; \quad (53)$$

$$c_r = c''_r + c'_r + c_{ur} = v_s \cos \beta [\sin(\beta - \alpha) + \cos \alpha \cos \beta]; \quad (54)$$

$$w = w'' - w' - w_u = v_s [\cos(\beta - \alpha) - \cos \alpha \sin \beta]; \quad (55)$$

$$c_u = c''_u = v_s \cos \alpha; \quad (56)$$

$$u = u'' + u' + u_u = v_s \frac{\sin(\beta - \alpha) + \cos \alpha \cos \beta}{\sin \beta}. \quad (57)$$

При подстановке выражения  $v_s$  из уравнения (57) в формулы (52)-(56) найдены зависимости скорости движения среды от окружной скорости турбины

$$c = u \sin \beta; \quad (58)$$

$$c_u = u \sin^2 \beta; \quad (59)$$

$$c_r = u \sin \beta \cos \beta; \quad (60)$$

$$w = u \sin \beta \frac{\cos(\beta - \alpha) - \cos \alpha \sin \beta}{\sin(\beta - \alpha) + \cos \alpha \cos \beta}; \quad (61)$$

$$c_u = u \frac{\cos \alpha \sin \beta}{\sin(\beta - \alpha) + \cos \alpha \cos \beta}. \quad (62)$$

Из уравнений (58)-(60) видно, что результирующие скорости  $c$ ,  $c_u$  и  $c_r$  не зависят от угла наклона  $\alpha$ . Фактически перечисленные скорости и окружная скорость турбины  $u$  зависят от направления ввода среды в одинаковой мере. Выражения (58)-(60) идентичны аналогичным формулам, полученным в работе [4] при другом методологическом рассмотрении параметров радиальной турбины.

Зависимости суммарных величин давлений от скорости потока  $v_s$  с учетом (1) и (2) имеют вид:

$$P = P'' + P' + P_u = \rho v_s^2 \frac{\cos \alpha}{\sin \beta} [\sin(\beta - \alpha) + \cos \alpha \cos \beta]; \quad (63)$$

$$P_u = P_u'' + P_u' + P_{uu} = \rho v_s^2 \cos \alpha \sin \beta [\sin(\beta - \alpha) + \cos \alpha \cos \beta]; \quad (64)$$

$$P_r = P_r'' + P_r' + P_{rr} = \rho v_s^2 \frac{\cos \alpha \cos^2 \beta}{\sin \beta} [\sin(\beta - \alpha) + \cos \alpha \cos \beta]; \quad (65)$$

$$P_u = P_{su} = \rho v_s^2 \frac{\cos^2 \alpha}{\sin \beta \cos \beta}, \quad (66)$$

а выраженные через окружную скорость турбины  $u$ :

$$P = \rho u^2 \frac{\cos \alpha \sin \beta}{\sin(\beta - \alpha) + \cos \alpha \cos \beta}; \quad (67)$$

$$P_u = \rho u^2 \frac{\cos \alpha \sin^3 \beta}{\sin(\beta - \alpha) + \cos \alpha \cos \beta}; \quad (68)$$

$$P_r = \rho u^2 \frac{\cos \alpha \sin \beta \cos^2 \beta}{\sin(\beta - \alpha) + \cos \alpha \cos \beta}; \quad (69)$$

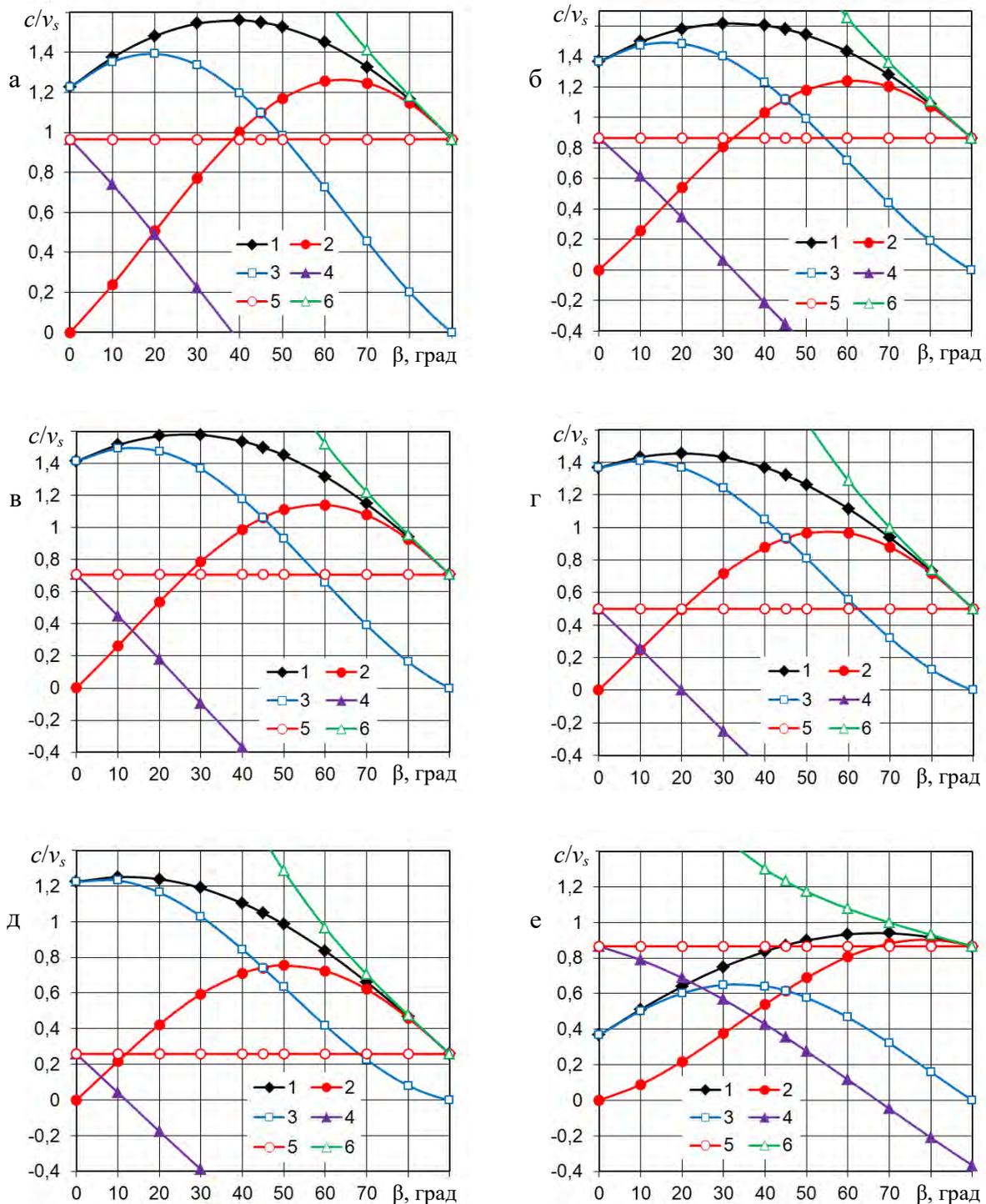
$$P_u = \rho u^2 \frac{\cos^2 \alpha \sin \beta}{\cos \beta [\sin(\beta - \alpha) + \cos \alpha \cos \beta]^2}. \quad (70)$$

Графические зависимости отношений скоростей в соответствии с формулами (52)-(57) к скорости движения среды  $v_s$  приведены на рисунке 7. При возрастании угла  $\alpha$  по модулю отношения скоростей к начальной скорости среды снижаются. При этом максимальные значения отношений  $c/v_s$ ,  $c_u/v_s$ ,  $c_r/v_s$  слегка сдвигаются в сторону меньших углов наклона лопастей. Наибольшие отношения  $u/v_s$  имеют место для малых значений углов  $|\alpha|$  и  $\beta$ . Отношение  $c_u/v_s$  не зависит от угла  $\beta$ . С увеличением угла  $|\alpha|$  относительная скорость среды  $w$  меняет свое направление на противоположное при меньших углах  $\beta$ .

Графическое изображение отношений скоростей в соответствии с формулами (58)-(62) приведено на рисунке 8. Отношения  $c/u$ ,  $c_u/u$  и  $c_r/u$  не зависят от значения угла  $\alpha$ , т.е. угол  $\alpha$  влияет на эти скорости в одинаковой мере, и кривые 1, 2 и 3 совпадают с соответствующими линиями, приведенными на рисунке 7 в работе [4], полученными при использовании иной методологии расчета параметров турбины. По мере возрастания угла  $\beta$  отношения  $c/u$  и  $c_u/u$  непрерывно повышаются, а отношение  $c_r/u$  первоначально увеличивается, принимает максимальное значение при  $\beta = 45^\circ$  и в дальнейшем снижается. С повышением углов  $\beta$  и  $\alpha$  по модулю возрастает отличие отношений  $v_s/u$  и  $c_u/u$ , а также увеличивается относительная скорость среды.

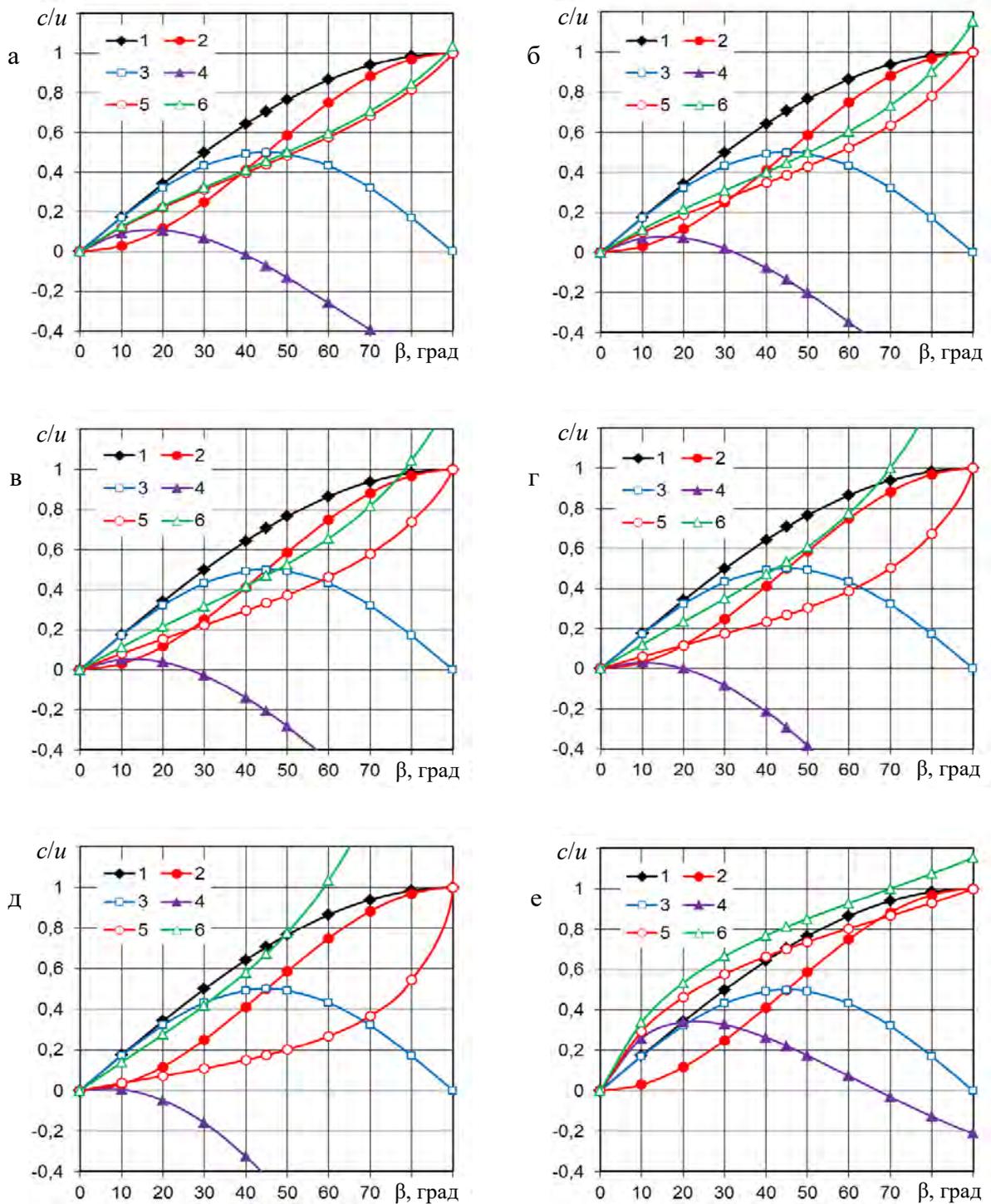
Графическое изображение отношений давлений по формулам (63)-(66) приведено на рисунке 9. Давление, создаваемое центробежной силой, учтено в других кривых, и отношение  $P_u/\rho v_s^2$  (кривая 4) присутствует на графиках для отображения его доли в создании давления среды в разных направлениях. Увеличение угла  $\alpha$  по модулю приводит к снижению всех рассматриваемых отношений скоростей. Максимальные величины давления среды в тангенциальном направлении, которое способствует вращению турбины, наблюдаются при малых углах  $|\alpha|$  и  $\beta = 55-65^\circ$ , поэтому для снижения материалоемкости турбины ее лопасти должны иметь углы, близкие к указанным величинам. Отношение  $P_u/\rho v_s^2$  больше отношения  $P_r/\rho v_s^2$  при  $\beta > 40-60^\circ$  (для разных углов  $\alpha$ ), следовательно, центробежная сила больше силы сопротивления движению среды в межлопастном пространстве и компенсирует ее. При малых углах  $\beta$  турбина воспри-

нимает больше энергии, но последняя расходуется преимущественно на обеспечение движения среды в радиальном направлении.



а –  $\alpha = -15^\circ$ ; б –  $\alpha = -30^\circ$ ; в –  $\alpha = -45^\circ$ ; г –  $\alpha = -60^\circ$ ; д –  $\alpha = -75^\circ$ ; е –  $\alpha = 30^\circ$ ;  
 1 –  $c/v_s$ ; 2 –  $c_u/v_s$ ; 3 –  $c_r/v_s$ ; 4 –  $w/v_s$ ; 5 –  $c_u/v_s$ ; 6 –  $u/v_s$

Рисунок 7. – Зависимости отношений скоростей от угла наклона лопастей при различных углах  $\alpha$



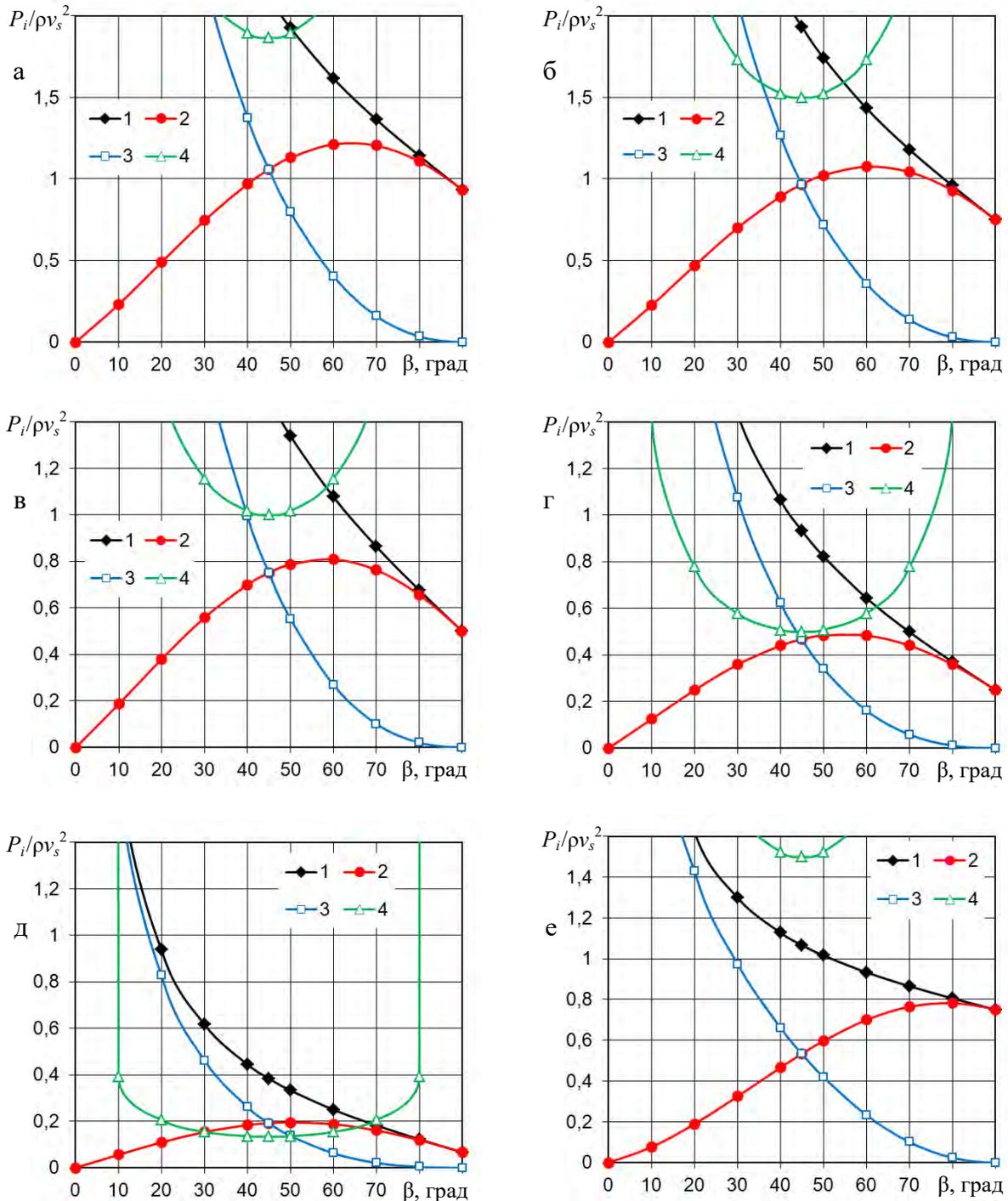
а –  $\alpha = -15^\circ$ ; б –  $\alpha = -30^\circ$ ; в –  $\alpha = -45^\circ$ ; г –  $\alpha = -60^\circ$ ; д –  $\alpha = -75^\circ$ ; е –  $\alpha = 30^\circ$ ;

1 –  $c/u$ ; 2 –  $c_w/u$ ; 3 –  $c_r/u$ ; 4 –  $w/u$ ; 5 –  $c_u/u$ ; 6 –  $v_s/u$

**Рисунок 8. – Зависимости отношений скоростей от угла наклона лопастей при различных углах  $\alpha$**

Графическое изображение отношений давлений по формулам (67)-(70) приведено на рисунке 10. Отношения  $P/\rho u^2$  и  $P_u/\rho u^2$  непрерывно увеличиваются с возрастанием угла  $\beta$  и со снижением  $|\alpha|$ . Увеличение угла  $|\alpha|$  снижает сопротивление лопастей движению среды в радиальном направлении. При возрастании  $\beta$  кривая 3 пер-

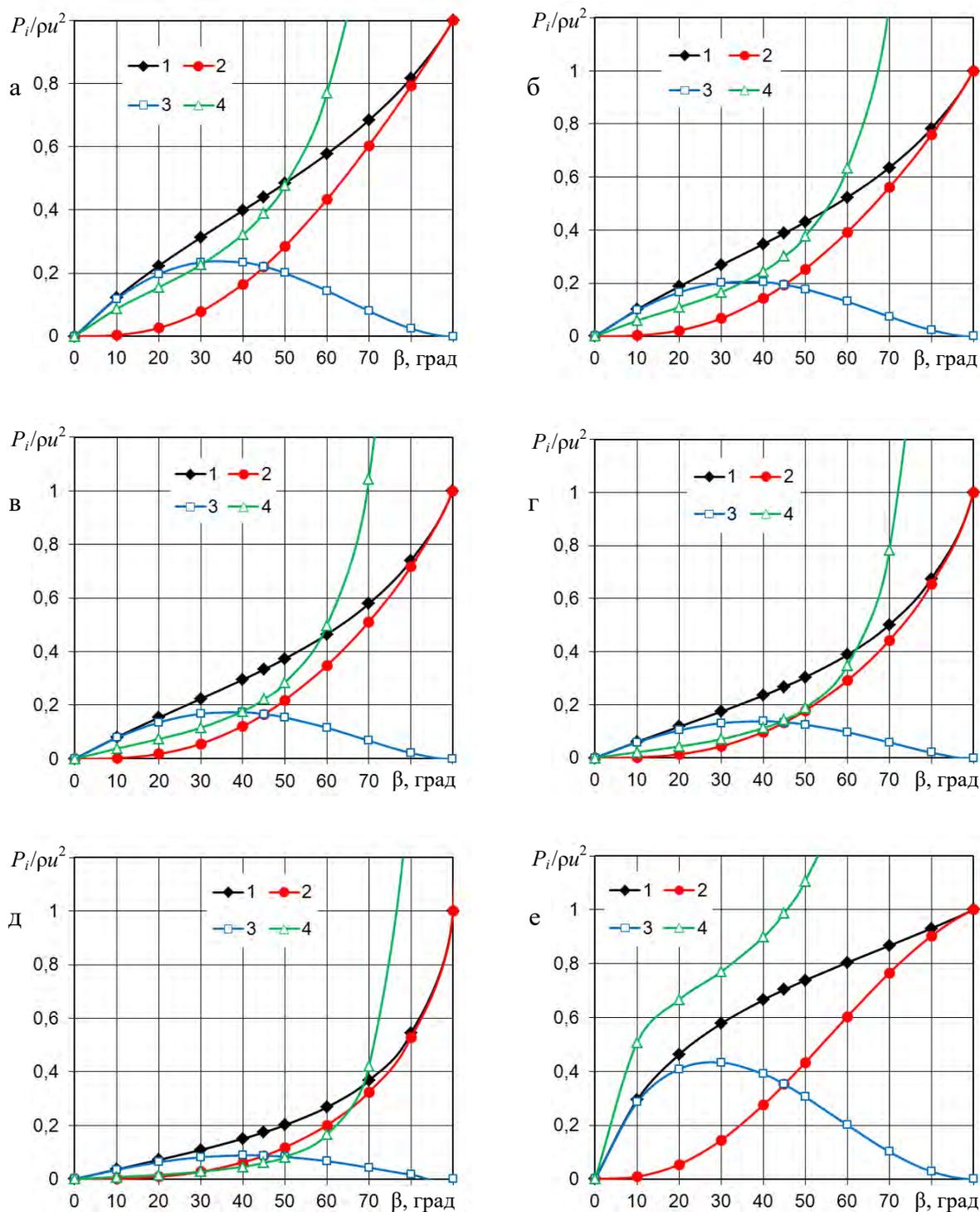
воначально возрастает, а затем при  $\beta > 30-40^\circ$  снижается. Влияние центробежной силы возрастает при увеличении угла  $\beta$  и снижении модуля угла  $\alpha$ . Максимальные значения давления на лопасть в тангенциальном направлении, способствующие увеличению крутящего момента, достигаются при больших углах наклона лопастей и малых углах  $\alpha$ .



а –  $\alpha = -15^\circ$ ; б –  $\alpha = -30^\circ$ ; в –  $\alpha = -45^\circ$ ; г –  $\alpha = -60^\circ$ ; д –  $\alpha = -75^\circ$ ; е –  $\alpha = 30^\circ$ ;

1 –  $P/\rho v_s^2$ ; 2 –  $P_{II}/\rho v_s^2$ ; 3 –  $P_r/\rho v_s^2$ ; 4 –  $P_u/\rho v_s^2$

Рисунок 9. – Зависимости давлений от угла наклона лопастей при различных углах  $\alpha$



а –  $\alpha = -15^\circ$ ; б –  $\alpha = -30^\circ$ ; в –  $\alpha = -45^\circ$ ; г –  $\alpha = -60^\circ$ ; д –  $\alpha = -75^\circ$ ; е –  $\alpha = 30^\circ$ ;  
 1 –  $P/\rho u^2$ ; 2 –  $P_w/\rho u^2$ ; 3 –  $P_r/\rho u^2$ ; 4 –  $P_u/\rho u^2$

Рисунок 10. – Зависимости давлений от угла наклона лопастей при различных углах  $\alpha$

### Выводы

Максимальные скорости среды в тангенциальном направлении и создаваемое давление наблюдаются при больших углах наклона лопастей  $\beta$  и малых (по модулю)

углах  $\alpha$ . При этом достигаются малые сопротивления движению среды в радиальном направлении и малые относительные скорости, от которых зависит сопротивление трения о лопасти при движении среды. Давление, создаваемое центробежной силой, сопоставимо, а при больших углах  $\beta$  превышает сопротивление движению среды в радиальном направлении, что повышает эффективность использования энергии среды. Максимальные значения давления на лопасть в тангенциальном направлении, способствующие увеличению крутящего момента, достигаются при больших углах наклона лопастей и малых углах  $\alpha$ , поэтому для рассматриваемой турбины рекомендуются указанные величины углов. Минимальная материалоемкость турбины может быть получена при угле наклона лопастей  $\beta \approx 60-70^\circ$ .

#### Список использованных источников

1. Смирнов, И.Н. Гидравлические турбины и насосы / И.Н. Смирнов. – М.: Высшая школа, 1969. – С. 85-88.
2. Кривченко, Г.И. Гидравлические машины. Турбины и насосы / Г.И. Кривченко. – М.: Энергия, 1978. – С. 69-72.
3. Павлечко, В.Н. Зависимость параметров центробежной турбины от угла наклона лопастей / В.Н. Павлечко // Горная механика и машиностроение. – 2016. – № 4. – С. 35-43.
4. Павлечко, В.Н. О работе радиальной турбины при вводе закрученного потока / В.Н. Павлечко // Горная механика и машиностроение. – 2017. – № 3. – С. 52-64.

---

**Pavlechko V.N.**

#### **Effect of centrifugal force on performance of the radial-flow turbine with swirling flow at the inlet**

*Characteristics of a radial-flow turbine were analyzed depending on the working-fluid flow direction. The fluid velocity caused by centrifugal force and appropriate pressure were considered indirectly, through other characteristics. Equations were derived to determine fluid velocity and turbine blades speed, the fluid pressure on the rotor blades depending on the rotor blade angle and fluid flow direction. Quotients of the current fluid velocity to its initial value and to the circumferential speed of the turbine as well as a quotient of pressure depending on the blade and fluid flow angles were graphically presented.*

*Keywords: radial turbine, blade angle, flow direction, fluid velocity, turbine speed, fluid pressure, centrifugal force.*

Поступила в редакцию 19.10.2017 г.

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

УДК 620.22:538.975:621.8.03

**ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ  
ТОНКОСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ**

Овчинников Е.В., Лиопо В.А., Эйсымонт Е.И. (УО «Гродненский государственный университет им. Янки Купалы», г. Гродно, Беларусь), Рискулов А.А. (Ташкентский институт по проектированию, строительству и эксплуатации автомобильных дорог, г. Ташкент, Узбекистан), Елкин А.И. (Институт машиностроения и автомобильного транспорта Владимирского государственного университета им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, г. Владимир, Россия)

*В статье рассмотрены вопросы формирования покрытий фторсодержащих олигомеров на твердых субстратах, получаемых по растворной технологии. Установлено влияние подложки на процессы структурирования в получаемых композиционных покрытиях. Показано, что термическая обработка фторсодержащих покрытий приводит к преобладанию процессов сшивки и окисления макромолекул фторсодержащих соединений. В результате данного воздействия образуются граничные слои с минимальной подвижностью макромолекул.*

Ключевые слова: покрытие, фторсодержащие олигомеры, структура, свойства, поверхностная энергия.

**Введение**

Широкое применение в промышленности получили тонкопленочные покрытия на основе фторсодержащих олигомеров, известных под торговыми марками «Фолеокс» и «Эпилам». Для придания тонкопленочным покрытиям заранее заданных эксплуатационных характеристик применяют различные методы структурного модифицирования. Методы основаны на предварительном активировании макромолекул полимерной матрицы с последующим их осаждением на поверхности субстрата. Применяют также методы предварительной активации поверхности, на которую наносят покрытие (рентгеновское, лазерное излучение, коронный и тлеющий разряд,  $\beta$ -излучение, механоактивация). Эффективна активация макромолекул путем плазмохимического инициирования и растворения олигомеров в летучих растворителях. Широко используемым методом является активация макромолекул фторсодержащих олигомеров после осаждения на субстрат. В результате этого полученные радикалы макромолекул «прививаются» к поверхностному слою, образуя прочные хемосорбционные связи.

Композиционные покрытия, сформированные с применением вышеуказанных технологий, позволяют обеспечить повышение надежности и увеличение эксплуатационного ресурса в узлах трения автотранспортной техники, герметизирующих устройств запорной арматуры и т.п. вследствие лучшего сохранения геометрических параметров сопряженных поверхностей трибоконтакта в процессе эксплуатации изделий.

Однако, несмотря на то, что изучению триботехнических характеристик покрытий как на основе чистых фторолигомеров, так и их нанокомпозитов посвящено значительное число исследований, к настоящему времени не существует единого методологического подхода, который позволял бы формировать фторсодержащие покрытия с заданными параметрами эксплуатационных характеристик при различных методах структурного модифицирования. Практический опыт применения фторированных по-

крытий, полученный к настоящему времени, показал, что достигнутый уровень эксплуатационных параметров не отвечает современным требованиям к надежности узлов трения. Это свидетельствует об отсутствии данных, необходимых для оптимизации технологических параметров формирования нанокomпозиционных покрытий заданной структуры, отсутствии адекватных представлений как о механизмах физико-химических процессов, так и процессах, происходящих на границе раздела. Практически отсутствуют данные об особенностях механизмов и кинетики формирования функциональных слоев фторсодержащих соединений на твердых субстратах различного состава и их строения в зависимости от режимов и условий реализации межфазных взаимодействий [1, 2].

Целью данной работы является исследование процессов формирования тонкопленочных фторсодержащих покрытий на подложках различной природы в зависимости от условий термообработки.

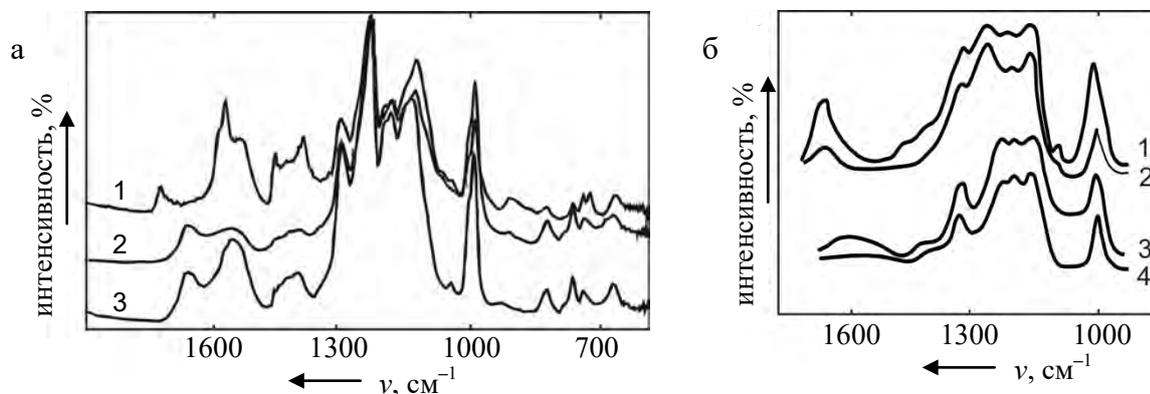
### Методика эксперимента

Исследовали металлополимерные системы, включающие металлический и олигомерный компоненты, изготовленные из материалов в состоянии промышленной поставки. Для композиционных покрытий применяли 1-2 % раствор в хладоне-137 фторсодержащих олигомеров (ФСО), выпускаемых под торговой маркой «Фолеокс», имеющих общую структурную формулу  $R_f-R_n$  ( $R_f$  – фторсодержащий радикал,  $R_n$  – концевая группа) [3]. Исследуемые олигомеры имели различную молекулярную массу от 2000 до 5000 ед. и строение концевых групп. В качестве подложек использовали медь М-1, алюминий А99, сталь (45, 08кп, ШХ-15), нитрид титана, слюду, стекло, политетрафторэтилен. Модифицирование композиционных покрытий проводили воздействием рентгеновского излучения, термообработкой, лазерным и СВЧ-излучениями. Анализ кинетики физико-химических процессов в композиционных покрытиях осуществляли с применением общепринятых методик (ИК- и ЭПР-спектроскопии, ДТА, ТСТ-спектроскопии, рентгеноструктурного исследования и т.д.).

### Результаты исследований

Одной из широко применяемых на производстве технологических операций является термическая обработка материалов, включающих в себя различные методы: отпуск, отжиг, закалка и т.п. Применение термообработки позволяет существенно изменить структуру и физико-механические характеристики не только металлов, но и полимеров, а также композиций на их основе. Проведение термообработки фторсодержащих покрытий, сформированных на металлических подложках, приводит к увеличению дихроизма полос поглощения в спектрах ФСО (рисунок 1). Однако при значениях  $T \approx T_{дестр}$  пленок ФСО происходит снижение дихроизма, что свидетельствует о преобладании деструктивных процессов. Различные типы металлических подложек (медь, железо, алюминий) оказывают одинаковое влияние на кинетику протекания изменения значений дихроизма при термической обработке. Значения дихроизма увеличиваются до  $T \approx 573$  К, при  $T > 573$  К – резко уменьшаются. Легкость протекания окислительных процессов на металлах обусловлена, по-видимому, каталитическим действием подложки. Зависимость угла ориентации молекул ФСО от температуры носит немонотонный характер. С увеличением температуры угол ориентации уменьшается, что соответствует параллельной укладке ФСО относительно подложки. В области температуры  $T \approx 573$  К наблюдается резкое возрастание угла  $Q$ . Данное увеличение значения  $Q$  свидетельству-

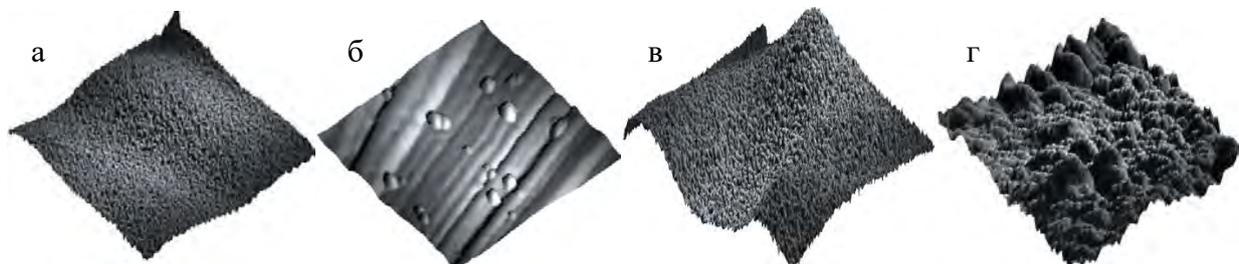
ет о деструкции макромолекул покрытия ФСО. Характер зависимости  $Q(T)$  характерен для всех изучаемых фторсодержащих олигомеров, нанесенных на различные металлы.



**а:** 1 – ФА (исходный); 2 – ФА (термообработка при 373 К в течение 60 минут); 3 – ФА (термообработка при 523 К в течение 60 минут); **б:** 1 – Ф1 (исходный); 2 – Ф1 (термообработка при 573 К в течение 60 минут); 3 – Ф14 (исходный); 4 – Ф14 (термообработка при 573 К в течение 60 минут)

**Рисунок 1.** – ИК-спектры МНПВО (многократно нарушенное полное внутреннее отражение) поглощения фторсодержащих олигомеров, нанесенных на медь

Проведенные рентгеноструктурные исследования тонкопленочных покрытий ФСО на металлах подтверждают данные ИК-спектроскопических исследований. Так зависимость  $I_i/I_k$  для исследуемых фторсодержащих олигомеров имеет вид параболы с точкой экстремума в области 473 К, что соответствует наибольшей степени упорядочения в ФСО. Проведенный расчет энергии деструкции ( $E_d$ ) фторсодержащих олигомеров показывает, что максимальное значение соответствует температуре 473 К. Таким образом, можно предположить, что температура теплостойкости для покрытий ФСО лежит в области 473 К. Термическая обработка покрытий ФСО оказывает существенное влияние на морфологию поверхности. Установлено, что температурные воздействия приводят к изменению топографии поверхностных слоев фторсодержащих покрытий. При  $T \approx 373$  К изменения почти не заметны, при  $T \approx 473$  К происходит образование крупных кристаллических структур с отчетливым зерненным характером и размером около 1-2 мкм. Наиболее качественные изменения наблюдаются при  $T \approx 573$  К, когда происходит образование «чешуек» размером 4-6 мкм и заглубляется рельеф (рисунок 2).

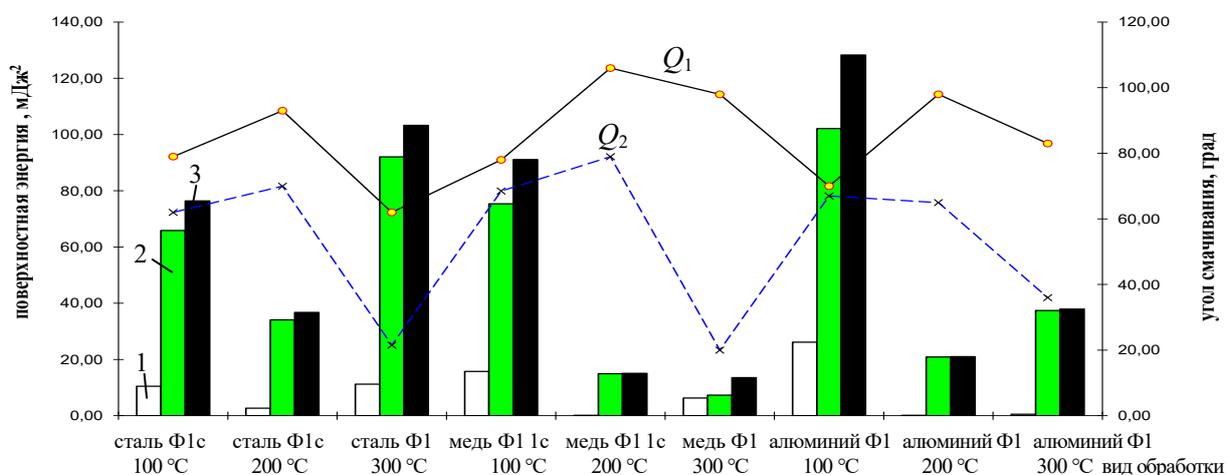


**а, б** – покрытие, сформированное из фторсодержащего олигомера Ф1 (подложка сталь); **в, г** – покрытие, сформированное из фторсодержащего олигомера В1 (подложка медь); **а, в** – термообработка при  $T = 373$  К в течение 60 мин; **б, г** – термообработка при  $T = 523$  К в течение 60 мин (поле сканирования  $25 \times 25$  мкм)

**Рисунок 2.** – Морфология поверхности покрытий фторсодержащих олигомеров, подвергнутых термической обработке

Термообработка полярных фторсодержащих олигомеров на различных металлических подложках приводит к аналогичным результатам. Воздействие температуры на неполярный фторсодержащий олигомер вызывает процессы кристаллообразования, только размеры кристаллических структур в 4-5 раз меньше по сравнению с образующимися кристаллами в покрытии, сформированном из полярного фолеокса.

Установлено, увеличение значений удельной поверхности в покрытиях ФСО при проведении термообработки. Структурные изменения, происходящие в покрытиях фторсодержащих олигомеров при проведении термической обработки, обусловлены снижением значений поверхностной энергии (рисунок 3), что приводит к диспергированию исходной структуры с образованием квазикристаллических частиц, имеющих различную дисперсность, в том числе находящуюся в нанобласти.

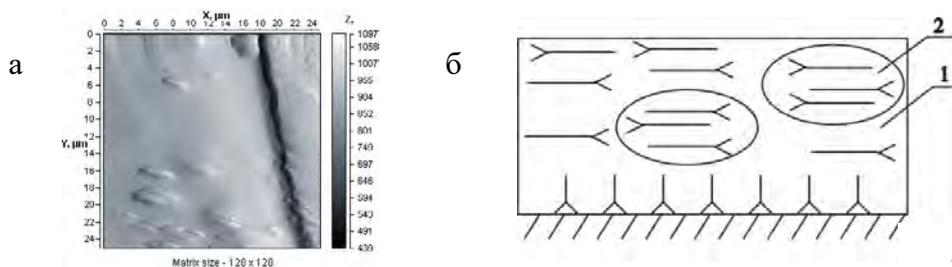


1 – дисперсионная составляющая; 2 – полярная составляющая; 3 – поверхностная энергия

Рисунок 3. – Зависимость угла смачивания, поверхностной энергии фторсодержащих покрытий и ее составляющих от материала подложки и параметров термообработки

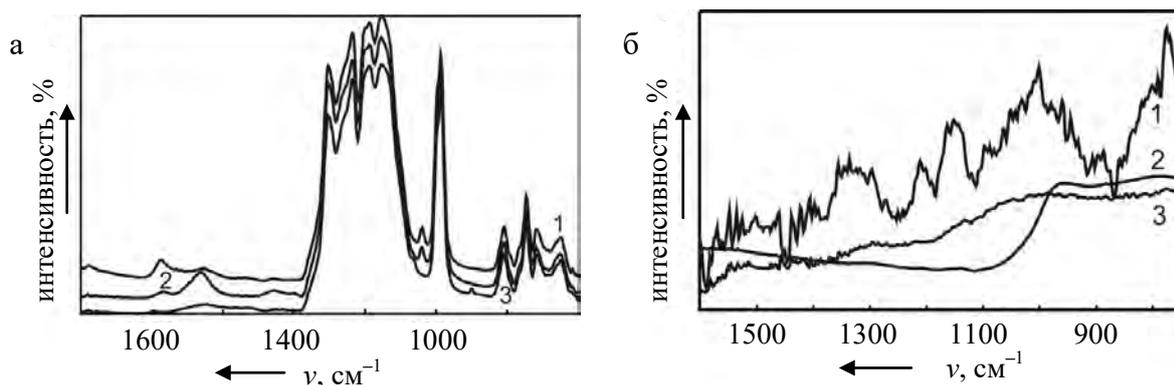
Исходя из проведенных исследований, можно предположить следующую феноменологическую модель строения тонкослойных фторсодержащих покрытий, сформированных на металлических подложках при проведении термообработки. Термообработка оказывает структурирующее воздействие на покрытие, сформированное на твердых телах, обуславливает формирование квазикристаллической нанофазы, содержание которой определяется технологическими параметрами обработки (температурой, временем). С увеличением значений температурного воздействия формируется нанофазное покрытие с характерной структурой, состоящей из олигомерной матрицы 1 и армирующих фаз 2 (рисунок 4а, 4б) [4]. Термообработка фторсодержащих покрытий, сформированных на активных подложках нитрида титана и хромового покрытия, модифицированного нанодисперсными кластерами алмаза (УДА), приводит к существенным изменениям в структуре фторсодержащих покрытий, что проявляется в интенсификации хемосорбционного взаимодействия фторсодержащих покрытий с подложкой [4, 5], о чем свидетельствует увеличение интенсивности полос поглощения  $1773 \text{ см}^{-1}$ ,  $1668 \text{ см}^{-1}$ .

Увеличение температуры термообработки фторсодержащих покрытий приводит к перераспределению интенсивностей, исчезновению или появлению новых полос поглощения в ИК-спектрах фторсодержащих олигомеров, что свидетельствует об интенсивных структурных трансформациях, происходящих в матрице фторсодержащего олигомерного покрытия, сформированного на подложках, содержащих нанодисперсные частицы.



**Рисунок 4. – Морфология (а) и схема строения (б) покрытий из фторсодержащих олигомеров «Фолеокс» на подложке из стали 45, термообработанных при 523 К [4]**

Покрытия, полученные на подложках, содержащих в своей структуре нанокластеры, характеризуются более высокой стойкостью к воздействию температур ( $T \approx 673$  К), при которых происходит полная деструкция олигомерного покрытия на металлических подложках, не содержащих нанодисперсные частицы. Проведение термообработки увеличивает интенсивность хемосорбционного взаимодействия, что выражается в увеличении интенсивности полос поглощения в указанной выше области ИК-спектра (рисунок 5а).



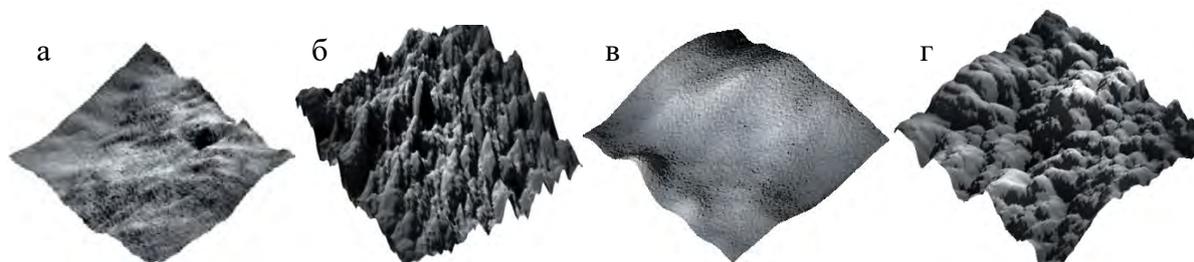
**а: 1 – покрытие ФСО Ф1, сформированное на подложке TiN; 2 – покрытие ФСО Ф1, сформированное на подложке TiN (термообработка при  $T = 373$  К в течение 60 мин); 3 – покрытие ФСО Ф1, сформированное на подложке TiN (термообработка при  $T = 473$  К в течение 60 мин); б: 1 – ИК-спектр вычитания покрытия ФСО Ф1, сформированного на подложке TiN (термообработка при  $T = 673$  К в течение 60 мин); 2 – ИК-спектр вычитания покрытия ФСО Ф1, сформированного на медной подложке (термообработка при  $T = 673$  К в течение 60 мин); 3 – ИК-спектр вычитания покрытия ФСО Ф1, сформированного на стальной подложке (термообработка при  $T = 673$  К в течение 60 мин)**

**Рисунок 5. – ИК-спектры покрытий фторсодержащих олигомеров, сформированных на металлических подложках, содержащих нанодисперсные частицы и подвергнутых термической обработке**

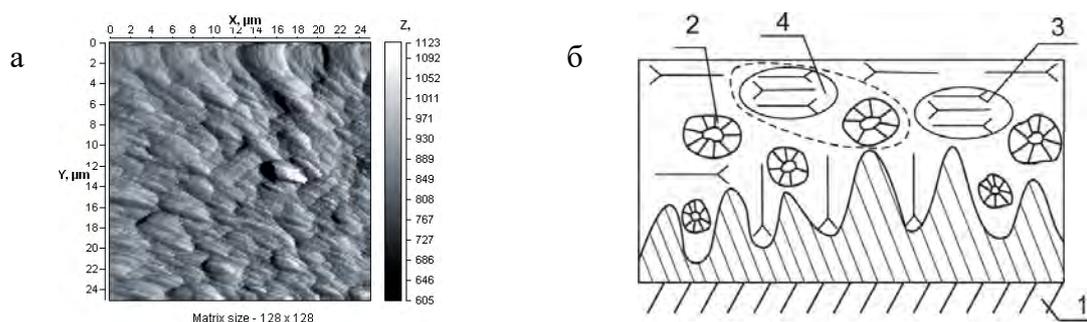
Структурные изменения в покрытии фторсодержащих олигомеров, сформированных на активных подложках, сопровождаются трансформированием морфологии поверхностных слоев (рисунок 6).

Исходя из полученных данных следует, что при термообработке фторсодержащих покрытий, сформированных на активных подслоях 1 (рисунок 7) (нитрид титана; электролитический хром, модифицированный частицами ультрадисперсного алмаза), реализуется комплексный механизм модифицирования олигомерной матрицы фторсо-

держащих соединений: формирование квазикристаллической нанофазы и структурирование матрицы низкоразмерными частицами, обладающими нескомпенсированным зарядом [6]. Возможно образование частиц 4, состоящих из структурированных областей 2 и квазикристаллической нанофазы 3 (рисунок 7).

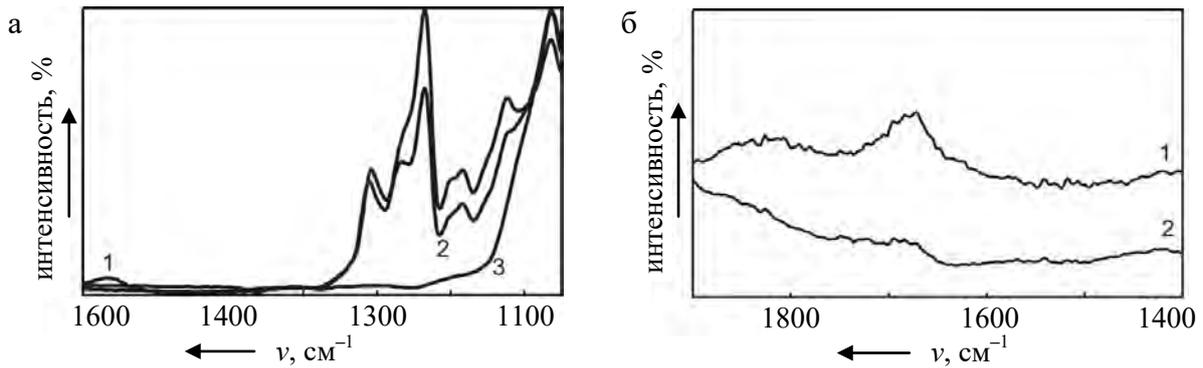


**а, б – покрытие, сформированное из фторсодержащего олигомера В1 (подложка TiN); в, г – покрытие, сформированное из фторсодержащего олигомера Ф1 (подложка электролитический хром, модифицированный нанодисперсными частицами алмаза детонационного синтеза); а, в – исходное покрытие фторсодержащего олигомера; б, г – термообработка при  $T = 523$  К в течение 60 мин (поле сканирования  $25 \times 25$  мкм)**  
**Рисунок 6. – Морфология поверхности покрытий фторсодержащих олигомеров, подвергнутых термической обработке**



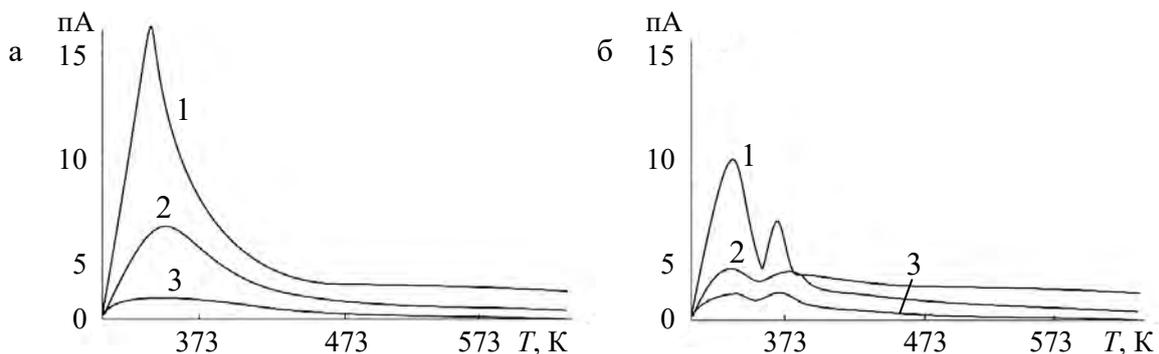
**Рисунок 7. – Морфология (а) и схема строения (б) покрытия из фторсодержащих олигомеров «Фолеокс» на подложке из нитрида титана, содержащего капельную фазу и термообработанных при 473 К (а, б)**

Термическая обработка фторсодержащих покрытий, сформированных на неметаллических материалах, как органического, так и неорганического происхождения, приводит к структурным эффектам подобным, как и при формировании покрытий на металлических поверхностях. Однако существует и ряд отличий. В области  $1540-1670$   $\text{см}^{-1}$ , соответствующей химическому взаимодействию покрытия с подложкой, появляются слабые полосы поглощения  $1667$   $\text{см}^{-1}$  (подложка слюда),  $1664$   $\text{см}^{-1}$  (подложка стекло),  $1655$   $\text{см}^{-1}$  (подложка фторопласт-4). Повышение температуры термообработки до  $T = 473$  К приводит к исчезновению полос поглощения в ИК-спектре НПВО фторсодержащих покрытий в диапазоне  $1540-1650$   $\text{см}^{-1}$  (рисунок 8а). Дальнейшее увеличение температуры приводит к полной деструкции покрытия с поверхности неметаллических подложек независимо от их типа. Используя методы обработки ИК-спектров НПВО фторсодержащих покрытий в специализированных программных средах, были получены ИК-спектры вычитания, согласно которым (рисунок 8б) наибольшее хемосорбционное взаимодействие с фторсодержащим покрытием проявляет слюда, затем следуют стекло и фторопласт-4.



**а:** 1 – покрытие ФСО Ф1, сформированное на слюдяной (мусковит) подложке ( $T = 373$  К в течение 60 мин); 2 – покрытие ФСО Ф1, сформированное на слюдяной подложке ( $T = 473$  К в течение 60 мин); 3 – покрытие ФСО Ф1, сформированное на слюдяной подложке ( $T = 573$  К в течение 60 мин); **б:** 1 – ИК-спектр вычитания покрытия ФСО Ф1, сформированного на слюдяной подложке (термообработка при  $T = 373$  К в течение 60 мин) и покрытия ФСО Ф1, сформированного на подложке политетрафторэтилена (термообработка при  $T = 373$  К в течение 60 мин); 2 – ИК-спектр покрытия ФСО Ф1, сформированного на слюдяной подложке (термообработка при  $T = 373$  К в течение 60 мин)  
**Рисунок 8.** – ИК-спектры покрытий фторсодержащих олигомеров, сформированных на неметаллических подложках и подвергнутых термической обработке

Более высокая хемосорбционная активность при повышенных температурах слюдяных подложек обусловлена их кристаллохимическим строением, который имеет следующий вид  $M_x^{+m} A_y^{+a} [Si_S, T_{4-S}] O_{10} (OH, F)_2$ , где  $M$ ,  $A$ ,  $T$  – межслоевой, октаэдрический и тетраэдрический катионы. Верхний индекс – валентность, нижний – число атомов, причем:  $m \cdot x = 1$ ,  $a \cdot y = 6$ , величина  $S$  зависит от  $t$ . В качестве  $M$  выступают ионы  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Li^+$ ,  $Ca^{+2}$ ; в качестве  $A$  –  $Fe^{+2}$ ,  $Fe^{+3}$ ,  $Mg^{+2}$ ,  $Mn^{+2}$ ,  $Al^{+3}$ ,  $Ti^{+4}$ ; в качестве  $T$  –  $Al^{+3}$ ,  $Ti^{+4}$ ,  $Fe^{+3}$ . Проведенные исследования активности подложек методом термостимулированной деполяризации показали, что для слюды в области 323-353 К наблюдается появление интенсивного термостимулированного тока (~15-16 пА) (рисунок 9), затем следуют стекло (~5-7 пА) и политетрафторэтилен.

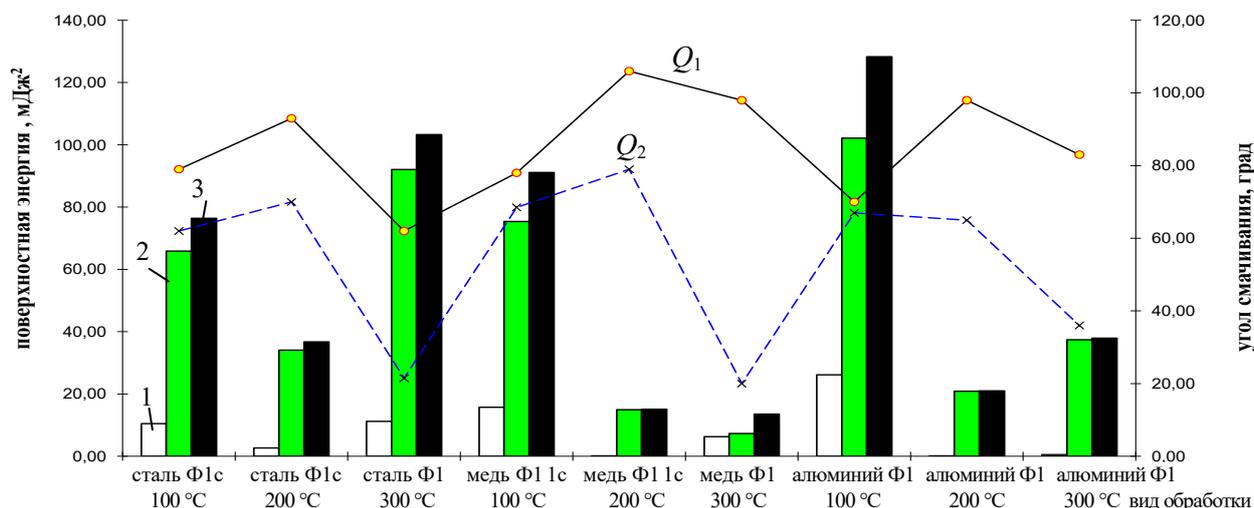


**а:** 1 – слюда; 2 – стекло; 3 – политетрафторэтилен; **б:** 1 – слюда с покрытием ФСО Ф1; 2 – стекло, с покрытием ФСО; 3 – политетрафторэтилен с покрытием ФСО Ф1  
**Рисунок 9.** – ТСТ-спектры неорганических материалов

Спектр термостимулированных токов неметаллических подложек изменяется при модифицировании их поверхности фторсодержащими олигомерами, появляется пик ТСТ в области 363-383 К, что может свидетельствовать о структурной перестройке в покрытиях ФСО, сформированных на поверхности данных материалов.

Исходя из кинетики изменения силы тока в электретоном образце, можно оценить кинетику изменения электретоного заряда в исследуемых покрытиях. Изучение влияния термической обработки на существование длительно сохраняющегося заряда показало, что для покрытий сформированных на неметаллических подложках (слюда) из полярных фторсодержащих олигомеров характерен гомозаряд, в то время как для покрытий сформированных из неполярных фторсодержащих олигомеров наблюдается устойчивый гетерозаряд, фактически не изменяющийся с течением времени.

Термическая обработка оказывает влияние на положение максимума у гомозаряда и на длительность его стабилизации у покрытий, сформированных из полярных фтороксов, с увеличением температуры термообработки время стабилизации электретоного заряда увеличивается. Термообработка оказывает незначительное влияние на кинетику изменения заряда для покрытий, сформированных из неполярных фтороксов, однако наблюдается увеличение значений электретоного заряда в покрытиях в 1,4-1,8 раза. Структурные превращения, изменение зарядовой активности «sandwich»-структур (подложка-покрытие) и морфологии в покрытиях, происходящие при воздействии энергетических факторов, оказывают влияние на поверхностную энергию данных систем (рисунок 10).



1 – дисперсионная составляющая; 2 – полярная составляющая; 3 – поверхностная энергия  
Рисунок 10. – Зависимость угла смачивания, поверхностной энергии фторсодержащих покрытий и ее составляющих от материала подложки и параметров термообработки

### Заключение

Изучена кинетика формирования фторсодержащих покрытий на металлических и неметаллических подложках. Установлено, что в процессе формирования покрытия основной структурной составляющей является «sandwich»-структура, которая образуется независимо от типа структуры фторсодержащего олигомера. Основным механизмом взаимодействия между металлической подложкой и фторсодержащим покрытием является химическое взаимодействие (хемосорбция), в результате которой образуются связи типа солей высших кислот. Полярность молекулы олигомера, концентрация раствора фторсодержащего олигомера оказывают решающее влияние на геометрические размеры кристаллических и аморфных областей покрытия, их морфологии и топографии. Как правило, сравнительно бездефектное покрытие образуют полярные фторсодержащие олигомеры Ф1, дефектное («островковое» покрытие) образуют неполярные

ФСО Ф14. Изучен процесс влияния энергетических факторов на структуру и свойства тонкопленочных покрытий из фторсодержащих олигомеров, сформированных на металлических подложках. Термическая обработка фторсодержащих покрытий приводит к преобладанию процессов сшивки и окисления макромолекул фторсодержащих соединений. Воздействие технологических факторов на структуру покрытий, сформированных на неметаллических подложках, из фторсодержащих олигомеров способствует образованию сферолитных надмолекулярных структур. В результате данного воздействия образуются граничные слои с минимальной подвижностью макромолекул. С увеличением толщины покрытия и дозы энергетического воздействия ориентационное влияние твердой подложки уменьшается, превалирующее влияние на структуру и свойства пленок оказывают надмолекулярные образования.

### Список использованных источников

1. Струк, В.А. Влияние фторсодержащих олигомеров на фрикционные свойства низкоскоростных металлополимерных пар / В.А. Струк, П.Н. Богданович, Е.В. Овчинников // Физика и технология тонкопленочных материалов: сб. трудов. – 1996. – Вып. 3. – С. 131-137.
2. Овчинников, Е.В. Ориентация фторсодержащих олигомеров типа «фолеокс» на поверхности металла и их триботехнические свойства / Е.В. Овчинников // Трение и износ. – 1994. – Т. 15, № 6. – С. 1098-1099.
3. Овчинников, Е.В. Тонкие пленки фторсодержащих олигомеров: основы синтеза, свойства и применение: монография / Е.В. Овчинников, В.А. Струк, В.А. Губанов. – Гродно: ГГАУ, 2007. – 326 с.
4. Тонкопленочные покрытия для трибосистем / Е.В. Овчинников [и др.] // Композиционные материалы в промышленности: материалы 29-ой междунар. конф., Ялта, 1-5 июня, 2009 г. – С. 466-472.
5. Триботехнические характеристики композиционных многослойных покрытий / Е.В. Овчинников [и др.] // Трение и износ. – 2000. – Т. 21, № 2. – С. 147-155.
6. Бойко, Ю.С. Морфологические особенности формирования тонкопленочных покрытий из растворов фторсодержащих олигомеров на различных подложках / Ю.С. Бойко, В.И. Кравченко, Е.В. Овчинников // Материалы, Технологии, Инструменты. – 1999. – № 4. – С. 42-46.

---

**Auchynnikaу Ya.V., Liopo V.A., Eisymont Ya.I., Riskulov A.A., Elkin A.I.**

### **Features of the technology of thin-layer coatings on the surface of solid bodies**

*The issues of formation of coatings of fluorine-containing oligomers on solid substrates, obtained by mortar technology, are examined in the article. The influence of the substrate on the processes of structuring in the obtained composite coatings is stated. It is demonstrated that heat treatment of fluorine-containing coating leads to the predominance of the processes of crosslinking and oxidation of macromolecules of fluorine-containing compounds. As a result of this impact, the boundary layers with minimal mobility of the macromolecules are formed.*

*Keywords: coating, fluorine-containing oligomers, structure, properties, surface energy.*

Поступила в редакцию 09.11.2017 г.

УДК 553.641:548.75

## ИЗУЧЕНИЕ МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА ФОСФОРИТОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ КАК СЫРЬЯ ДЛЯ КИСЛОТНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ

Шевчук В.В., Островский Л.К., Поткина Т.Н., Войтенко А.И. (ГНУ «Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси», г. Минск, Беларусь)

*Изучен минералогический состав апатитовых и фосфоритовых концентратов в целях использования для солянокислотной переработки в процессе производства фосфорных удобрений. Показано, что фосфатсодержащим минералом изученных месторождений фосфоритов является карбонатфторapatит (франколит), а состав нефосфатных компонентов различается. В качестве примесных минералов в марокканском фосфоритовом концентрате содержится кварц и глинистые минералы, в алжирском – глауконит, а каратауский фосфоритовый концентрат содержит магnezальные силикаты и кварц.*

Ключевые слова: апатитовый концентрат, фосфоритовый концентрат, минералогический состав, фторкарбонатapatит, кальцит, доломит.

### Введение

В настоящее время для кислотной переработки фосфатного сырья в технологии получения фосфорных удобрений и фосфорной кислоты используются серная, фосфорная и азотная кислоты. Соляная кислота пока не нашла широкого применения для этих целей. Однако соляная кислота, благодаря ее доступности, низкой стоимости и высокой химической активности по отношению к фосфатам, является одним из перспективных реагентов для использования при активировании фосфатного сырья и последующего получения на его основе комплексных удобрений.

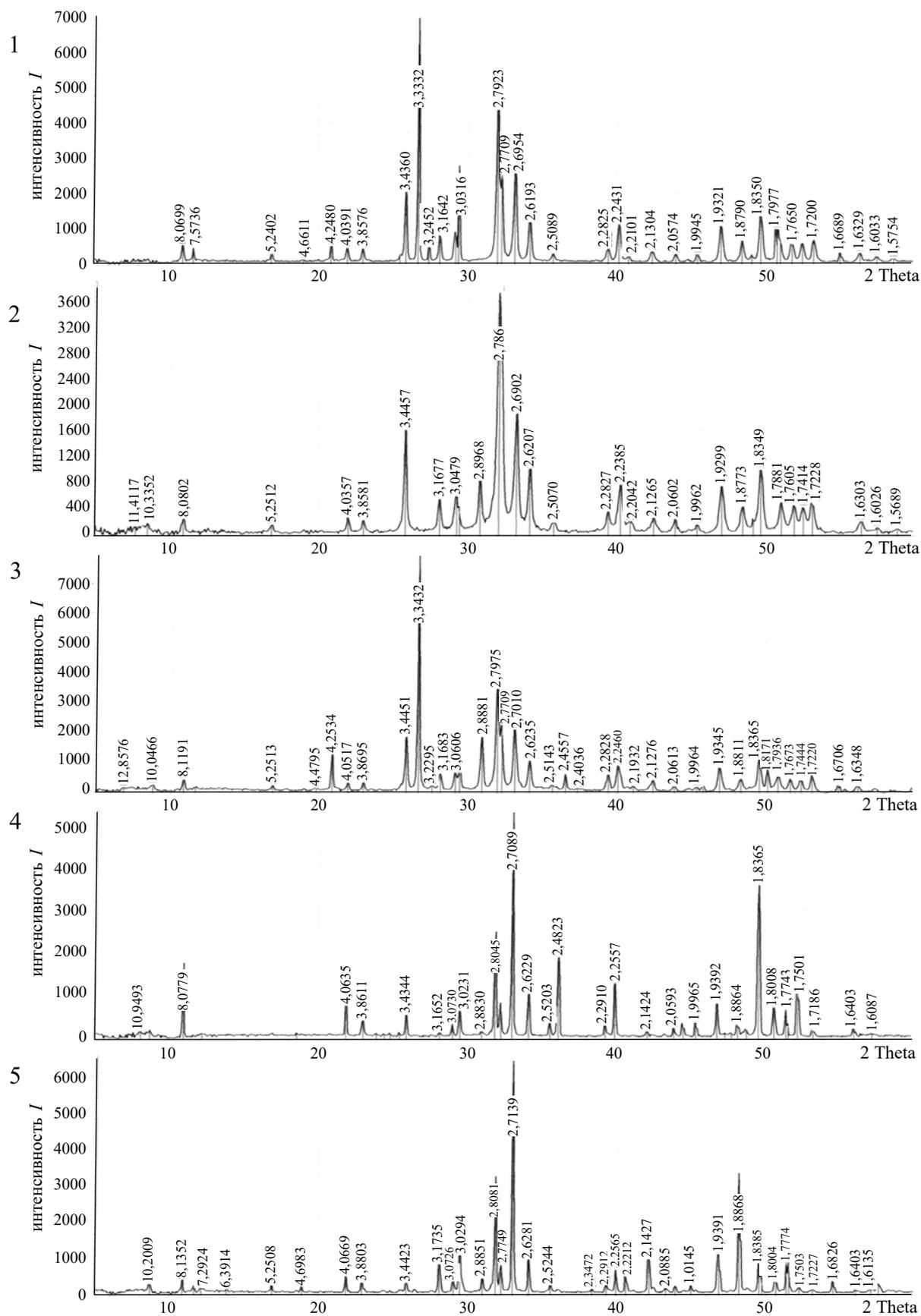
Минералогический состав руд – это конкретные характеристики, обуславливающие их поведение как в процессе обогащения, так и в процессе химической переработки. Изучение различных фосфоритовых концентратов с точки зрения состава позволит сделать практические выводы по более рациональному использованию фосфатного сырья.

Выбор объектов исследования определялся доступностью, известными данными по максимальному содержанию полезного компонента, транспортной логистикой, исходной ценой материала.

### Результаты исследований

Исследования проводили на ковдорском и кировском апатитовых (Россия), каратауском (Казахстан), марокканском и алжирском фосфоритовых концентратах. В качестве основных методов исследования состава и свойств фосфатных минералов использовали рентгенофазовый и дифференциально-термический анализы (ДТА), ИК-спектроскопию. Использование комплекса взаимодополняющих методов позволяет наиболее полно оценить и правильно интерпретировать полученные результаты.

Запись рентгенограмм проводили на рентгеновском дифрактометре D8 ADVANCE, BRUKER, ФРГ (CuK $\alpha$ -излучение; 30 кВ; 10 мА; скорость съемки 1 град/мин) с программой, включающей сопоставление дифракционных максимумов с данными картотеки JCPDS (рисунок 1).



1 – марокканский; 2 – каратауский; 3 – алжирский; 4 – ковдорский; 5 – Кировский  
Рисунок 1. – Дифрактограммы фосфоритовых концентратов

Как видно из рисунка 1, марокканский фосфоритовый концентрат представлен в основном минералом изоморфного ряда фторкарбонатапатитов и кварцем, а в качестве примесей в нем присутствует кальцит. Количественный состав, исходя из рентгенограммы, следующий, %: фторкарбонатапатит – 85; кальцит – 4; кварц – 7. После термообработки дифракционные линии карбоната исчезают, и состав прокаленного образца представлен остаточным количеством курскита и фторапатитом, который образовался в результате разложения карбонатной составляющей фторкарбонатапатита, присутствующего в исходном концентрате. Содержание доломита в марокканском фосфоритовом концентрате недостаточно для проявления на рентгенограммах, однако его присутствие фиксируется методами ИК-спектроскопии и ДТА. На рентгенограмме нерастворимого остатка после солянокислотного разложения марокканского фосфоритового концентрата четко видны дифракционные линии, характерные для кварца и  $\text{CaF}_2$ , наличие последнего не вызывает сомнений, так как  $\text{CaF}_2$ , по данным [1], не переходит в раствор при разложении фосфатного сырья соляной кислотой.

Каратауский фосфоритовый концентрат представлен фторкарбонатапатитом с примесью хлорапатита в качестве фосфатной составляющей и минералов-примесей: кальцита, доломита, магнезиальных силикатов, кварца. Исходя из рентгенограммы, приблизительный количественный состав следующий, %: фторкарбонатапатит – 60; доломит – 9; кальцит – 4; кварц – 22. После прокаливания каратауского фосфоритового концентрата дифракционные линии, соответствующие карбонатам кальция и магния, не проявляются, а в нерастворимом остатке содержится практически чистый кварц с незначительными примесями глины.

В алжирском фосфоритовом концентрате наряду с фторкарбонатапатитом присутствует в качестве фосфатной составляющей фторгидроксилапатит, а в качестве примесей – кварц, кальцит, доломит и глауконит. Приблизительный количественный состав следующий, %: фторгидроксилапатит – 26; курскит – 60; кальцит – 3; доломит – 2,5; кварц – 2. На рентгенограмме образца после прокаливания исчезают дифракционные линии, относящиеся к карбонатам. Фосфатная составляющая представлена фторапатитом с примесями курскита.

Перераспределение интенсивностей дифракционных линий предполагает существование широких изоморфных замещений  $\text{Ca}^{+2}$  и  $\text{F}^-$  в соответствующих анионных и катионных подрешетках структуры апатита.

Установлено, что флотационный ковдорский концентрат состоит в основном из апатита и карбонатгидроксилапатита, примесных фаз форстерита  $\text{Mg}_2\text{SiO}_3$  – минерала группы оливина, содержащего в своем составе  $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ , и карбонатов. Карбонаты представлены в основном кальцитом  $\text{CaCO}_3$  и незначительным количеством доломита  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ . Приблизительный количественный состав, исходя из рентгенограммы, следующий, %: апатит – 65; фторкарбонатапатит – 15; кальцит – 6; форстерит – 6. Основное количество магния в ковдорском концентрате сосредоточено в виде форстерита, который прочно связан с поверхностью кристаллов апатита. После термообработки карбонатная составляющая карбонатгидроксилапатита удаляется, и фосфатная часть представлена фторапатитом. Рентгенофазовый анализ осадка после обработки ковдорского апатитового концентрата соляной кислотой подтверждает присутствие магния в основном в виде форстерита.

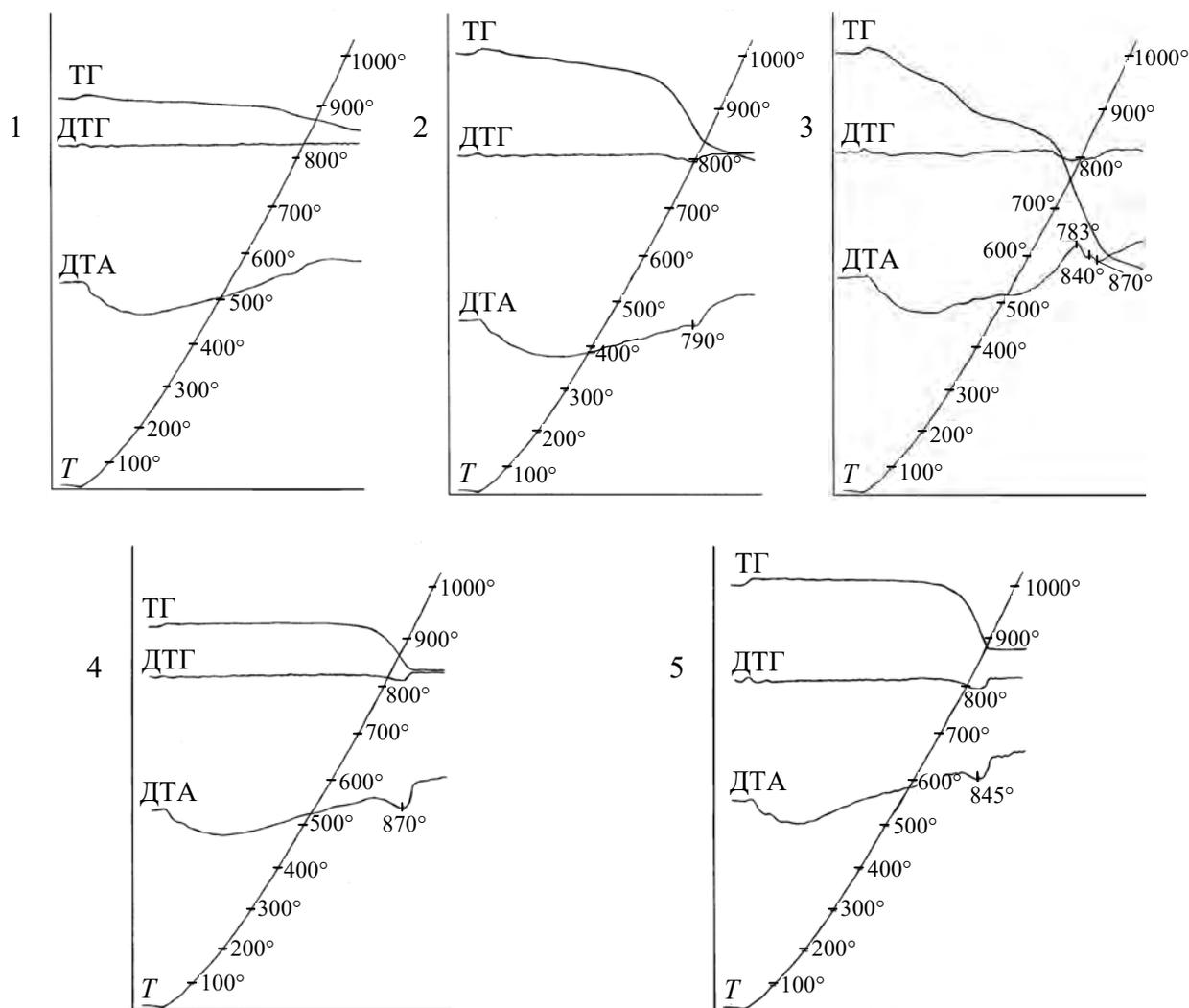
Кировский апатитовый концентрат представлен кристаллическим апатитом с небольшой примесью кальцита и кварца, о чем свидетельствуют не интенсивные дифракционные линии на рентгенограмме нерастворимого остатка, соответствующие кварцу. Количественный состав, исходя из рентгенограммы, следующий, %: апатит – 92; кальцит – 6; доломит – 2.

Данные дериватографических исследований дополняют и подтверждают представления о минералогии фосфатного вещества. С его помощью определяются содержание и структурное положение летучих компонентов, таких как  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$ , в составе фосфатов.

Степень замещения фосфат-иона карбонат-ионом в фосфатном минерале влияет на ряд технологических свойств перерабатываемых фосфоритовых концентратов. От содержания карбонат-ионов зависит расход кислоты, необходимый для разложения фосфатных концентратов, а также скорость их разложения. Параметры оборудования зависят от содержания кальцита и доломита, так как при их разложении выделяется  $\text{CO}_2$ , что влечет за собой образование пены, объем которой следует учитывать.

Термический анализ проводили с использованием дериватографа Q-1000 (фирма MOM Венгрия) при скорости нагревания 10 град/мин в интервале температур 20-1000 °С с навеской образца 700 мг.

Дериватограммы изучаемых фосфоритов представлены на рисунке 2.



1 – марокканский; 2 – каратауский; 3 – алжирский; 4 – ковдорский; 5 – Кировский

Рисунок 2. – Дериватограммы фосфоритовых концентратов

Как видно из рисунка 2, в марокканском фосфорите содержится небольшое количество несвязанной в структуре фосфата адсорбционной воды, которая начинает удаляться при нагреве до 80 °С, и процесс завершается при температуре 250 °С, а затем начинается выделение конституционно связанной воды. Выделение воды из кристаллической решетки фосфатов протекает постепенно и в широком интервале температур. Полное ее удаление заканчивается при 700 °С, общая потеря веса за счет удаления воды

составляет 0,43 %. Кроме того, в этом интервале температур параллельно протекает процесс дегидратации глинистых примесных минералов – гидрослюда и др. [2]. При дальнейшем возрастании температуры наблюдается более резкое падение кривой ТГ, и потеря массы составляет 2,29 %, в интервале температур 700-750 °С происходит декарбонизация магнийкарбонатной составляющей доломита, и частично протекает процесс разложения фторкарбонатапатита с удалением CO<sub>2</sub>. Процесс декарбонизации карбонатной составляющей доломита завершается при температуре 860 °С.

В каратауском фосфорите область потери воды (адсорбционной и конституционной) ограничивается температурой 670 °С. Так как ход кривой ТГ пологий, удаление воды происходит постепенно, то в данном случае четко определить количество адсорбционной воды затруднительно. Общее содержание воды в образце составляет 1,4 %. При температуре выше 670 °С начинается происходить реакция декарбонизации фосфата и разложения доломита. Содержание CO<sub>2</sub> составляет 2,6 %. Из-за малого теплового баланса этой реакции экзотермика образования новой апатитоподобной фазы выражена слабо. Выше 830 °С происходит доразложение кальцита, завершающееся при температуре 1000 °С, плавно переходящее в процесс термической диссоциации фосфата. На кривой ДТГ при температуре 740 °С наблюдается дополнительный эндоэффект, подтверждающий разложение примеси доломита.

Алжирский фосфорит имеет ряд отличий от описанных выше марокканского и каратауского фосфоритов. Одним из отличий является явно выраженная трехступенчатая дегидратация. В интервале температур 70-250 °С удаляется адсорбционная вода (1,4 %). Выделение конституционной воды отмечается в двух температурных областях: 250-420 °С (1,4 %) и 420-660 °С (1,2 %). Суммарное содержание воды в фосфате составляет 4 %, в том числе конституционной – 2,6 %. В интервале температур 660-900 °С происходит разложение основной массы карбонатсодержащих минералов, потеря массы при этом составляет 9,4 %.

Следует обратить внимание на довольно отчетливый экзоэффект, непосредственно предшествующий эндотермическому эффекту при 783 и 830 °С, который соответствует выгоранию органической фазы, распределенной во фторапатите, и переход его в эндоэффект (870 °С), что свидетельствует о продолжающемся выделении CO<sub>2</sub>. Однако величина экзотермического эффекта указывает на небольшое содержание органики в фосфорите (до 1,5 %).

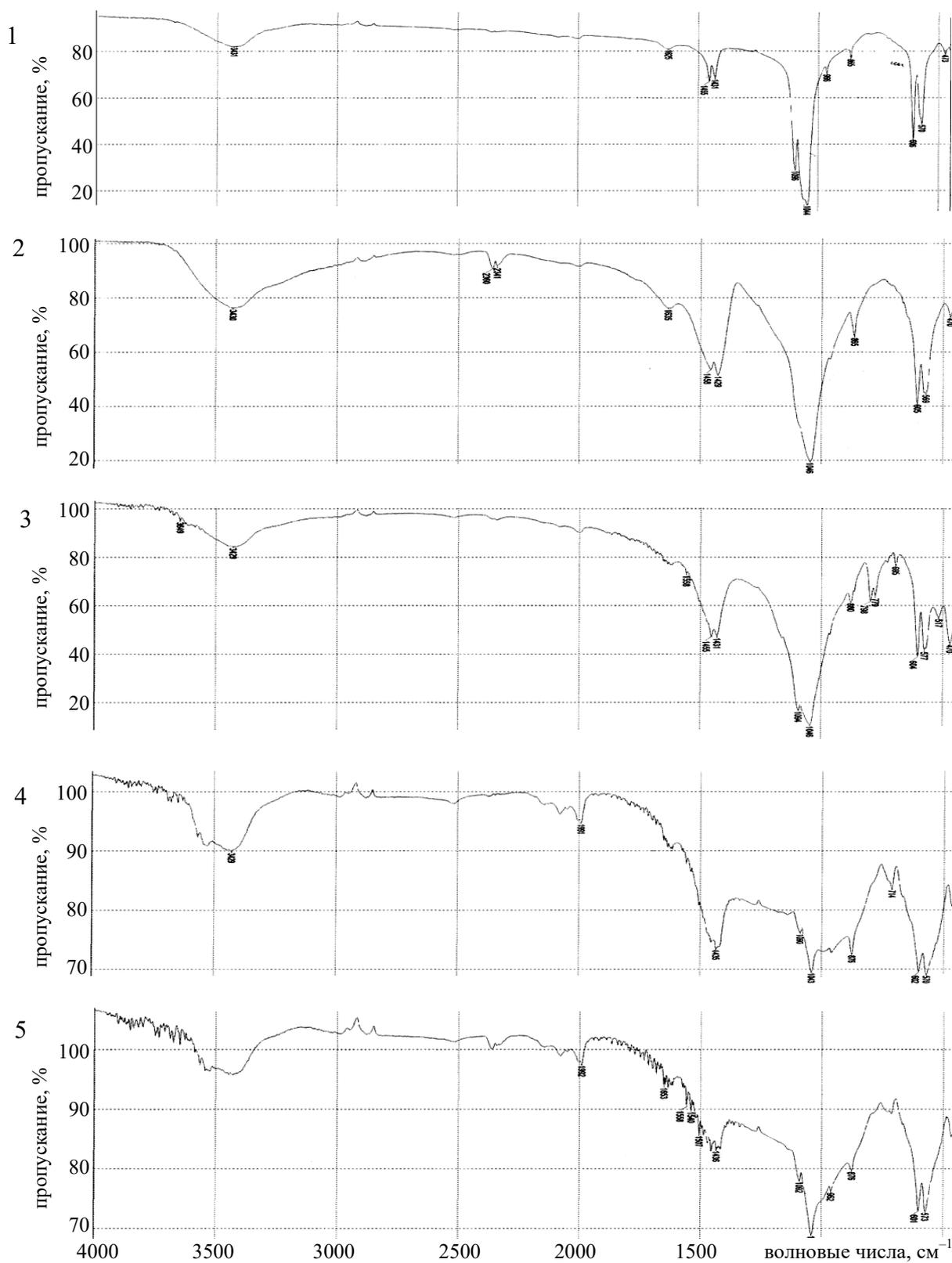
В ковдорском апатите присутствуют незначительные количества как адсорбционной, так и конституционной воды. Разложение карбонатов начинается при температуре 700 °С. При температуре выше 740 °С наблюдается резкая потеря массы, и полностью этот процесс заканчивается при 900 °С. Потеря массы составляет 2,86 %. Этот процесс сопровождается эндотермическим эффектом, пик которого приходится на 870 °С, что соответствует разложению карбонатов и удалению CO<sub>2</sub>.

Дериватограмма Кировского апатита аналогична дериватограмме ковдорского апатита. Она подтверждает наличие карбонатов, потеря массы в интервале температур 700-845 °С составляет 3,2 %.

Таким образом, нами показано, что во всех исследованных образцах присутствует связанная вода, карбонатная составляющая в виде кальцита и доломита, часть CO<sub>2</sub> входит в состав фосфатного вещества фосфоритов.

С целью более подробного изучения структурных особенностей фосфоритовых концентратов использован метод инфракрасной спектроскопии. Спектры образцов минералов снимали на спектрофотометрах Мидак, модель 2000 и Аватар-330 с Фурье-преобразованием, используя приставку диффузного отражения, которая позволяет анализировать образцы минералов, нанесенные на порошкообразный оптически прозрач-

ный носитель, в области  $4000-400\text{ см}^{-1}$  с разрешением  $4\text{ см}^{-1}$ . ИК-спектры представлены на рисунке 3.



1 – марокканский; 2 – каратауский; 3 – алжирский; 4 – ковдорский; 5 – кировский  
Рисунок 3. – ИК-спектры фосфоритовых концентратов

В ИК-спектре марокканского фосфоритового концентрата присутствуют полосы поглощения связей Р-О фосфат-иона при частотах 1096, 1044, 606, 570  $\text{см}^{-1}$ . Эти же полосы поглощения присутствуют в ИК-спектре после нагрева образца до 1000 °С (после ДТА). Они обусловлены ассиметричными валентными колебаниями и ассиметричными деформационными колебаниями аниона  $(\text{PO}_4)^{-3}$  и характерны для фосфатного минерала фосфоритов. Две полосы поглощения в области 1455 и 1431  $\text{см}^{-1}$  относятся к аниону  $(\text{CO}_3)^{-2}$  и свидетельствуют о снижении симметрии этого аниона.

Присутствие двух полос в этой области частот можно объяснить вхождением карбонат-иона в структуру фосфатного минерала фторкарбонатапатита (франколит). В спектрах карбонатных минералов присутствует одна полоса поглощения ассиметричных колебаний аниона  $(\text{CO}_3)^{-2}$  в этой области частот. Как видно из спектрограммы, после термической обработки этого образца фосфоритового концентрата поглощение в этой области существенно уменьшается, но не исчезает полностью, так как карбонат-ион из структуры фторапатита полностью удаляется при более высокой температуре. Полоса поглощения в области 865  $\text{см}^{-1}$ , относящаяся к деформационным колебаниям аниона  $(\text{CO}_3)^{-2}$ , которая исчезает после нагревания, свидетельствует о наличии в образце доломита. Полоса поглощения при 1625  $\text{см}^{-1}$  относится к деформационным колебаниям связанной  $\text{OH}^-$  группы, 3431  $\text{см}^{-1}$  – полосы валентных колебаний  $\text{OH}^-$  группы, которые исчезают после прокаливания. Таким образом, установлено присутствие в структуре фосфатного минерала гидроксильных и карбонатных групп.

Такая картина с небольшими изменениями характерна для всех изученных в работе фосфоритов.

ИК-спектр каратауского фосфоритового концентрата аналогичен спектру марокканского фосфоритового концентрата с той лишь разницей, что полосы поглощения карбонат иона, как входящего в структуру фосфатного минерала, так и относящиеся к карбонатам кальция и магния, значительно более интенсивны. Интенсивность полос поглощения валентных и деформационных колебаний  $\text{OH}^-$  группы (частоты 3430 и 1635  $\text{см}^{-1}$ ) также больше. Небольшое плечо в области 966  $\text{см}^{-1}$  обычно относят к селективной полосе силиката.

Алжирский фосфоритовый концентрат также содержит карбонат-ион в структуре фосфатного вещества, о чем свидетельствуют две полосы поглощения в области 1431 и 1455  $\text{см}^{-1}$ . На этом спектре четко фиксируются две полосы поглощения в области 779 и 798  $\text{см}^{-1}$ , которые подтверждают содержание в образце кальцита и доломита. Спектры фосфоритов и апатитов различаются, что связано с различным минеральным составом этих веществ.

На спектрограммах ковдорского апатита четко проявляются полосы поглощения в области 876  $\text{см}^{-1}$ , относящиеся к деформационным колебаниям аниона  $(\text{CO}_3)^{-2}$ , в области 1435  $\text{см}^{-1}$  – к ассиметричным валентным колебаниям этого аниона, характеризующие присутствие в ковдорском апатите доломита и кальцита. Одиночная полоса в области 714  $\text{см}^{-1}$  принадлежит вибрационным колебаниям  $\text{OH}^-$ -группы и подчеркивает связь ее проявления с высокой концентрацией иона  $\text{F}^-$  в апатите. После прокаливания образца эта полоса поглощения исчезает. С другой стороны, поглощение в этой области соответствует колебаниям мостиковых связей Р-О-Р. Присутствие этой полосы свидетельствует о возникновении в структуре апатита пирофосфатной группы. Полосы поглощения в области 3400  $\text{см}^{-1}$  обусловлены валентным колебанием связей группировок  $\text{OH-F}$  и  $\text{OH-O}$ . Связь  $\text{OH-F}$  придает прочность апатиту [3].

В спектре кировского апатита присутствуют полосы поглощения слабой интенсивности в области 1436 и 876  $\text{см}^{-1}$ , свидетельствующие о присутствии небольшого количества карбонатных примесей. Поглощение в области 573, 601  $\text{см}^{-1}$  средней интен-

сивности относятся к валентным колебаниям аниона  $(\text{PO}_4)^{3-}$ , полоса поглощения слабой интенсивности в области  $1092 \text{ см}^{-1}$  и наиболее интенсивная полоса поглощения в области  $1042 \text{ см}^{-1}$  – к асимметричным валентным колебаниям этого аниона.

На всех спектрах фосфоритов присутствуют полосы поглощения в области  $470$  и  $1000\text{-}1100 \text{ см}^{-1}$ , которые характерны для кварца. Также практически во всех образцах присутствует некоторое количество глины. Для подтверждения этого были сделаны ИК-спектры нерастворимого остатка, полученного после обработки фосфатов соляной кислотой в наиболее оптимальном режиме.

На спектрограммах нерастворимого остатка марокканского фосфорита присутствует интенсивная полоса в области  $1079 \text{ см}^{-1}$ , относящаяся к валентным колебаниям связи Si-O-Si, и полоса поглощения деформационных колебаний связи Si-O в области  $466 \text{ см}^{-1}$ , которые подтверждают присутствие кварца и глины в фосфоритовом концентрате. Раздвоение основной полосы поглощения в области  $1000\text{-}1100 \text{ см}^{-1}$  обусловлено наложением двух полос поглощения валентных колебаний связей Si-O-Si глинистой составляющей. В этой области также находится полоса поглощения Si-O-Si – связей кварца. Появление полосы в области  $530 \text{ см}^{-1}$  можно отнести к поглощению связей Ca-F и Si-F и связать с образованием в системе аналогичных соединений типа  $\text{CaF}_2$  и  $\text{SiF}_4$ .

ИК-спектр нерастворимого остатка алжирского фосфоритового концентрата аналогичен нерастворимому остатку марокканского фосфоритового концентрата.

В ИК-спектре нерастворимого остатка каратауского фосфоритового концентрата присутствует полоса поглощения в области  $3619 \text{ см}^{-1}$ , относящаяся к колебаниям структурированных групп  $\text{OH}^-$  вблизи иона  $\text{Mg}^{+2}$ , размытая полоса поглощения  $3421 \text{ см}^{-1}$  – OH-связям сорбционной воды. Слабые полосы поглощения в области  $1600\text{-}1800 \text{ см}^{-1}$  относятся к колебаниям  $\text{OH}^-$  групп глины. Интенсивная полоса поглощения в области  $1000\text{-}1160 \text{ см}^{-1}$  относится к валентным колебаниям связей Si-O-Si силикатов, которые в этой области проявляют одну интенсивную полосу поглощения и две более слабые. Полосы поглощения  $798$ ,  $779$ ,  $695 \text{ см}^{-1}$  принадлежат симметричным колебаниям связи Si-O-Al, а  $516$ ,  $468 \text{ см}^{-1}$  – деформационным колебаниям связи Si-O.

На спектрограмме нерастворимого остатка ковдорского апатита полосы слабой интенсивности  $3566$ ,  $3542 \text{ см}^{-1}$  относятся к колебаниям структурированной межпакетной воды в глинах, в дополнение к этим полосам поглощения в нем присутствуют слабые полосы в области  $1400\text{-}1600 \text{ см}^{-1}$ , также относящиеся к полосам поглощения глин. Сильная полоса  $1043 \text{ см}^{-1}$  и две менее интенсивные  $1093$  и  $962 \text{ см}^{-1}$  относятся к силикатам и алюмосиликатам. Таким образом, можно заключить, что небольшой остаток в ковдорском апатитовом концентрате представлен глинистым минералом, предположительно форстеритом, который не растворяется в соляной кислоте.

В ИК-спектре остатка кислотного разложения Кировского апатита присутствует полоса поглощения структурированных групп  $\text{OH}^-$   $3685 \text{ см}^{-1}$ , а также размытая полоса поглощения OH-связей адсорбционной воды при  $3410 \text{ см}^{-1}$ . Полоса при  $957 \text{ см}^{-1}$  сильной интенсивности принадлежит асимметричным колебаниям связи O-Si-O кварца. Основная полоса и плечо в области более высоких частот свидетельствуют о наличии кварца в образце.

Методом ИК-спектроскопии подтверждено присутствие карбонат-иона в структуре фосфатного минерала и в примесях, к которым относятся кальцит и доломит, а также кварца, алюмосиликатных (глинистых) минералов.

Исследования под микроскопом показывают, что фосфатные компоненты всех месторождений фосфоритов представлены бесструктурными зёрнами, в отличие от концентратов апатитовых месторождений, представленных кристаллическими частицами.

### Заключение

Установлено, что фосфатные минералы фосфоритовых концентратов изученных месторождений представлены фторкарбонатапатитом для марокканского, с примесями фторгидроксилапатита для алжирского и хлорапатита для каратауского фосфоритового концентрата. Во всех исследованных образцах присутствует карбонатная составляющая, которая входит в состав фосфатного вещества фосфоритов (фторкарбонатапатит), а часть связана в карбонатах типа кальцита и доломита. В качестве примесных минералов фосфориты содержат кварц и глинистые минералы (марокканский фосфорит), глауконит (алжирский фосфорит), магнезиальные силикаты и кварц (каратауский фосфорит). Флотационный ковдорский концентрат состоит в основном из апатита и карбонатгидроксилапатита. Кировский апатитовый концентрат представлен кристаллическим апатитом с небольшой примесью кальцита и кварца.

Полученные результаты (данные по минералогическому составу) будут положены в основу процессов и аппаратурно-технологической схемы переработки фосфоритов с использованием соляной кислоты. Этот способ может рассматриваться как перспективный, экономически целесообразный вариант переработки даже низкокачественного фосфатного сырья.

### Список использованных источников

1. Термографическое исследование фосфатного вещества фосфоритов / В.З. Блисковский [и др.] // Труды ГИГХСа. – 1975. – Вып. 30. – С. 105-141.
2. Вейдерма, М. Исследование фосфатного вещества оболочковых фосфоритов методом инфракрасной спектроскопии / М. Вейдерма, Рэна Кнубовец // Известия Академии наук Эстонской ССР. – 1972. – Т. 21. – С. 57-61.
3. Накамото, К. ИК-спектры и спектры КР неорганических и координационных соединений / К. Накамото. – М.: Мир, 1991. – 536 с.

---

**Shevchuk V.V., Astrouski L.K., Potkina T.N., Vaitenka A.I.**

### **The study of the phosphate concentrates mineralogical makeup for acid processing**

*The mineralogical makeup of the apatite and phosphorite concentrates has been studied in order to be used for the hydrochloric acid processing in the production of phosphate fertilizers. It is shown that the phosphate-containing mineral of the studied phosphorites deposits is carbonatefluorapatite (francolite), and the composition of non-phosphate components is different. Impurity minerals in the Moroccan phosphorite concentrate are quartz and clay minerals, in Algeria – glauconite, and the Karatau phosphorite concentrate contains magnesia silicates and quartz.*

*Keywords: apatite concentrate, phosphorite concentrate, mineralogical composition, fluorcarbonapatite, calcite, dolomite.*

Поступила в редакцию 05.09.2017 г.

УДК 678.073.661.481

## ОПТИЧЕСКИЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ ИТТРИЙ-АЛЮМИНИЕВОГО ГРАНАТА, АКТИВИРОВАННОГО ИОНАМИ ЦЕРИЯ

Давыдова О.В., Дробышевская Н.Е., Подденежный Е.Н., Бойко А.А., Павленок А.В. (УО «Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого», г. Гомель, Беларусь), Шаповалов В.М. (ГНУ «Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси», г. Гомель, Беларусь)

*Изучены новые варианты термохимического синтеза ультрадисперсных порошков иттрий-алюминиевого граната, легированного ионами церия (желтого люминофора) для применения в оптических композитах. Установлено, что размеры первичных частиц YAG:Ce (средний размер области когерентного рассеяния) составляют  $D \approx 45,3$  нм – для порошка, полученного горением в муфельной печи, и  $D \approx 50,3$  нм – для порошка, полученного в СВЧ-печи. На основе синтезированных порошков получены стеклокерамические и полимерно-кристаллические композиты с улучшенными люминесцентными свойствами.*

Ключевые слова: *оптические композиты, ультрадисперсные порошки, иттрий-алюминиевый гранат, активация, ионы церия.*

### Введение

Оксидные люминофоры применяются в составе твердотельных источников освещения – светодиодных ламп и светильников для маркировки и контроля товаров и продуктов [1]. Среди многочисленных применений оксидных люминофоров к настоящему времени выделилась наиболее перспективная отрасль светотехники – твердотельное освещение, которая решает глобальную задачу повсеместной замены содержащих ртуть люминесцентных ламп и экономии энергетических ресурсов. Многолетние исследования в мировом масштабе (в том числе Нобелевская премия по физике 2014 года за изобретение синих светодиодов и ярких источников белого света) привели к разработке нового класса осветительных приборов на основе полупроводниковой нитридной структуры, покрытой желтым люминофором, излучение которой для глаза воспринимается как белый свет. В качестве желтого люминофора чаще всего используются микрокристаллические порошки иттрий-алюминиевого граната, активированного ионами церия  $Y_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$  (YAG:Ce). Такие светодиоды характеризуются повышенной цветовой температурой (холодный белый свет), при этом промышленные способы синтеза люминесцирующего порошка граната базируются на энергозатратных реакциях прямого синтеза из соответствующих оксидов, требующих высоких температур спекания (1500-1600 °С) в условиях газовой восстановительной среды [2].

Новая идея удаления люминофора от поверхности чипа дает возможность более гибких подходов к конструированию фотолюминесцентных преобразователей, которые могут быть изготовлены на основе композиционных материалов [3]. Для этих конструкций предпочтительнее использовать люминофоры в виде ультрадисперсных порошков, однородно распределенных в прозрачных или светорассеивающих матрицах. Полимерно-кристаллические люминофорные материалы для светопреобразователей, которые разрабатываются рядом фирм в последнее время, имеют сложный состав, в который входит полимерная прозрачная матрица, порошок люминофора и различные функ-

циональные наполнители. Так, в работе [4] подробно рассмотрены составы полимерной люминесцентной композиции и влияние наполнителей на эффективность излучения. Для получения однородного белого излучения, без разложения его на синюю и желтую составляющие, третьим компонентом в состав люминофорно-полимерной композиции вводился оптический рассеиватель из неорганических материалов с высоким коэффициентом отражения ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ).

В РФ (ОАО «Институт пластмасс имени Г.С. Петрова») запатентована полимерная люминесцентная композиция для получения белого цвета, возбуждаемая синим светодиодом [5]. Предлагаемая полимерно-кристаллическая структура включает следующие компоненты, в массовых частях: прозрачный полимер – 100; фотолюминофор на основе граната  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$  или  $\text{Gd}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$ , или на основе смеси указанных соединений – 1,5-5,0; воск полиэтиленовый в виде порошка с размером частиц 18-30 мкм – 0,1-0,7; стабилизатор – 0,2-1,0. В качестве прозрачного полимера может быть использован поликарбонат, полистирол или сополимер стирола с акрилонитрилом и бутадиеном. В качестве стабилизатора композиция может содержать соединение из группы стерически затрудненных фосфитов.

Фирма Radiant Flex (США) недавно выпустила опытные образцы удаленных фотолюминесцентных преобразователей на основе полимерно-кристаллической структуры [6], изготовленные на поликарбонатной пленке, пригодные для СД светильников большого размера и любой формы. Главной проблемой, по мнению изготовителей, является достижение равномерного распределения люминесцирующего порошка по объему пленки и повышение ее термостойкости.

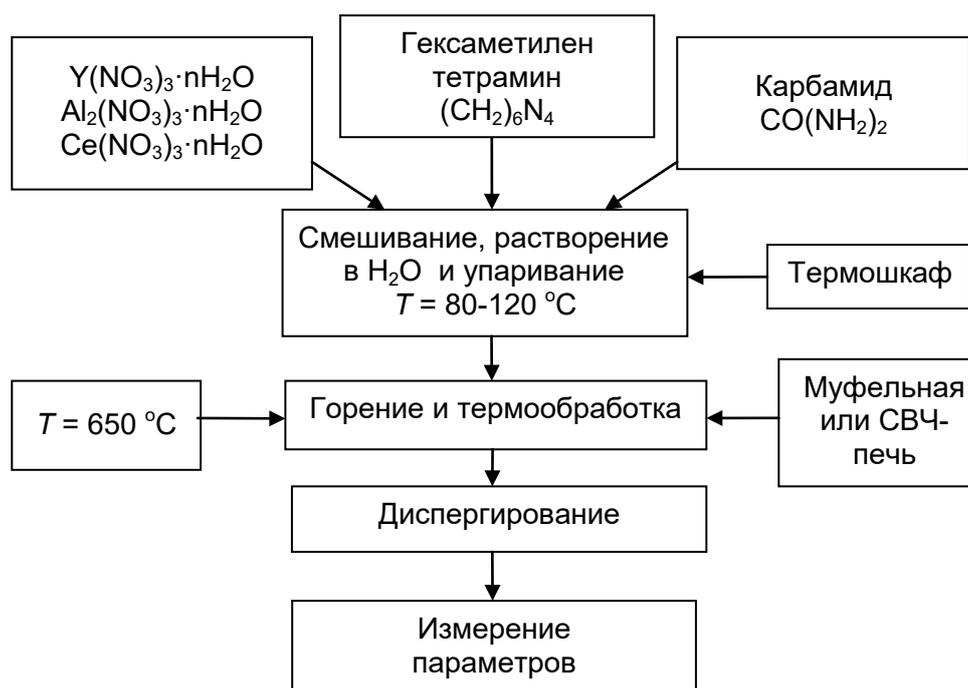
Цель работы – разработка новых вариантов синтеза ультрадисперсных порошков иттрий-алюминиевого граната, активированного ионами церия, предназначенного для изготовления удаленных светопреобразователей на основе стеклокерамических и полимерно-кристаллических композиционных материалов.

### Методы исследований

Для изучения физико-химических, структурных, оптических и люминесцентных свойств синтезированных материалов были использованы методы рентгенофазового анализа (РФА) (дифрактометр ДРОН-7), сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) (микроскоп TESCAN, Чехия). Исследования параметров пористости и удельной поверхности образцов осуществляли методом Брюнауэра-Эммета-Телера (БЭТ) в ИХП НАН Украины. Спектры люминесценции и ее возбуждения регистрировались с помощью спектрофлуориметра СДЛ-2, исправлялись с учетом спектральной чувствительности системы регистрации и распределения спектральной плотности возбуждающего излучения (ИФ НАНБ). Спектрально-люминесцентные исследования полученных порошков проводились при возбуждении люминесценции светом ртутной лампы с набором фильтров при комнатной температуре. Исследование люминесцентных характеристик стеклокерамических и полимерно-кристаллических композитов проводили на установке, созданной на основе монохроматора МДМ-4 с использованием светодиодов с излучением  $\lambda = 465$  нм.

### Экспериментальная часть

Методика синтеза для получения люминесцентного ультрадисперсного порошка химического состава  $\text{Y}_{2,95}\text{Ce}_{0,05}\text{Al}_5\text{O}_{12}$ , используемого в качестве активного наполнителя в композитах, приведена на рисунке 1.



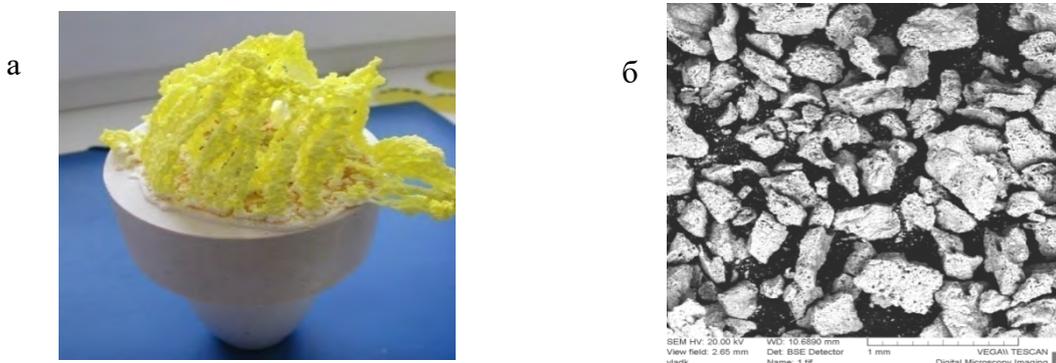
**Рисунок 1. – Схема термохимического синтеза ультрадисперсных порошков иттрий-алюминиевого граната, активированного ионами церия**

Взвешиваем ингредиенты в следующем соотношении: 23,0 г –  $Y(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ ; 38,0 г –  $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ ; 1,0 г –  $Ce(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ ; 21,6 г – карбамида –  $CH_4N_2O$ , растворяем ингредиенты в 30,0 мл дистиллированной воды и добавляем в смесь 2,4 г гексаметилентетрамина  $(CH_2)_6N_4$ . (ЧДА, содержание аминов 99,9 %, код CAS # 100-97-0). Размешиваем раствор до полного растворения сухой массы. Полученный раствор ставим в термостойкой выпарительной чаше в термошкаф с температурой 100 °C и при помешивании концентрируем раствор до состояния вязкого геля (1,5-2 часа).

Далее закрываем чашу алюминиевой фольгой, прорезываем отверстия для выхода газов и помещаем эту чашу в другую, большего диаметра, и ставим в муфельную печь, нагретую до температуры 350 °C. В печи под воздействием быстрого нагрева проходит бурная химическая реакция окисления-восстановления, инициируемая с помощью ГМТА, температура повышается до 1200-1300 °C (оценочные данные), и далее продукт выдерживается в печи при температуре поджига – 650 °C в течение 1 часа. За время выдержки удаляются остаточные молекулы воды, выгорают органические остатки и после остывания печи извлекается выпарительная чаша, в которой формируется пенообразный губчатый продукт ярко желтого цвета.

Сформированный на первом этапе технологической схемы раствор в фарфоровом тигле, закрытом керамической крышкой с отверстиями, можно также ставить в бытовую СВЧ-печь, без вращения, по методу, впервые описанному в статье [7]. При включении мощности 700-800 Вт через 3-5 мин происходит процесс испарения воды и бурный процесс горения с выделением большого количества газов и водяного пара. В тигле и на крышке образуется твердый волокнистый продукт ярко желтого цвета (рисунок 2а). Весь процесс занимает от 10 до 15 мин в зависимости от объема исходного раствора.

Губчатая структура пенообразного продукта легко разрушается до отдельных агрегатов (рисунок 2б), и далее полученные крупные частицы порошка подвергаются дроблению в ступке или размолу в планетарной мельнице в течение 15 мин.



а – рост волокон граната при нагреве смеси в СВЧ-печи; б – порошок после дробления  
Рисунок 2. – Образцы синтезированного порошка YAG:Ce

### Результаты и их обсуждение

Установлено, что структура, морфология частиц порошков иттрий-алюминиевого граната, активированного ионами церия в термохимическом процессе, в значительной степени зависит от состава горючего и последующей термической обработки. Размеры частиц-агрегатов, рассчитанные из данных по удельной поверхности порошкообразных образцов после их размолу и прокаливания в интервале 700-1200 °С, находятся в области от 0,98 мкм до 3,8 мкм в зависимости от температуры прокаливания (рисунок 3).

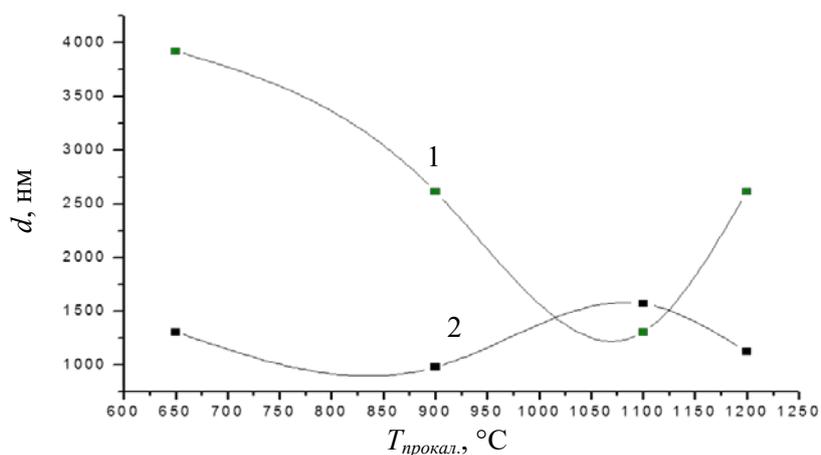


Рисунок 3. – Условный размер агрегатов иттрий-алюминиевого граната, легированного церием, полученного при горении в карбамиде (1) и смеси карбамид и ГМТА (2) в зависимости от температуры прокаливания

При термообработке с поверхности агрегатов удаляются адсорбированные газы и гидроксильные группы, и минимум размеров частиц находится в области температуры 1100 °С (для карбамид, используемого в качестве горючего) и при температуре 900 °С – для сложного горючего «карбамид – ГМТА». Отличия в размерах частиц связаны, скорее всего, с более высокой температурой, развиваемой при горении сложного

горючего, и более интенсивным удалением адсорбированных газов и гидроксидов с поверхности агрегатов.

Размеры агрегатов определяли по формуле [8]:

$$S = \frac{\pi d^2 \cdot 1000}{\rho \pi / 6d^3}$$

где  $d$  – диаметр частиц;

$S$  – удельная поверхность сферических частиц диаметром  $d$ , состоящих из материала плотностью  $\rho$ .

Поскольку  $S$  измеряется в  $\text{м}^2/\text{г}$ ,  $d$  – в нм ( $10^{-9}$  м),  $\rho$  – в  $\text{г}/\text{см}^3$  ( $4,85 \text{ г}/\text{см}^3$ ), то в формуле для  $S$  появляется множитель 1000. Зная удельную поверхность материала и его пикнометрическую плотность, представляется возможным определить условный диаметр частиц. Поэтому данный метод определения размера кристаллитов является оценочным.

Средний размер областей когерентного рассеяния (ОКР) ультрадисперсных частиц (условный диаметр  $d$ ) определяли по величине уширения рентгенографических максимумов (расчет по формуле Шеррера [9]):

$$d = \frac{k \cdot \lambda}{\beta \cdot \cos(2\theta / 2)},$$

где  $d$  – диаметр наночастицы, нм;

$\beta$  – ширина рентгеновского максимума на полувысоте (рад),

$\lambda$  – длина волны рентгеновского излучения ( $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$  для медного излучения),

$k$  – коэффициент формы частиц (обычно, можно считать  $k \approx 1$ ).

Следует отметить, что уравнение предполагает отсутствие микроискажений в кристаллической решетке анализируемого вещества. Расчет дал значение  $D \approx 50,3$  нм для порошка YAG:Ce, полученного в СВЧ-печи. В то же время средний диаметр первичных частиц порошка YAG:Ce, полученного горением в муфельной печи, составляет  $D \approx 45,3$  нм.

Дифрактограмма образца порошка YAG:Ce, полученного горением в смеси нитраты – карбамид – ГМТА в СВЧ-печи, приведена на рисунке 4.

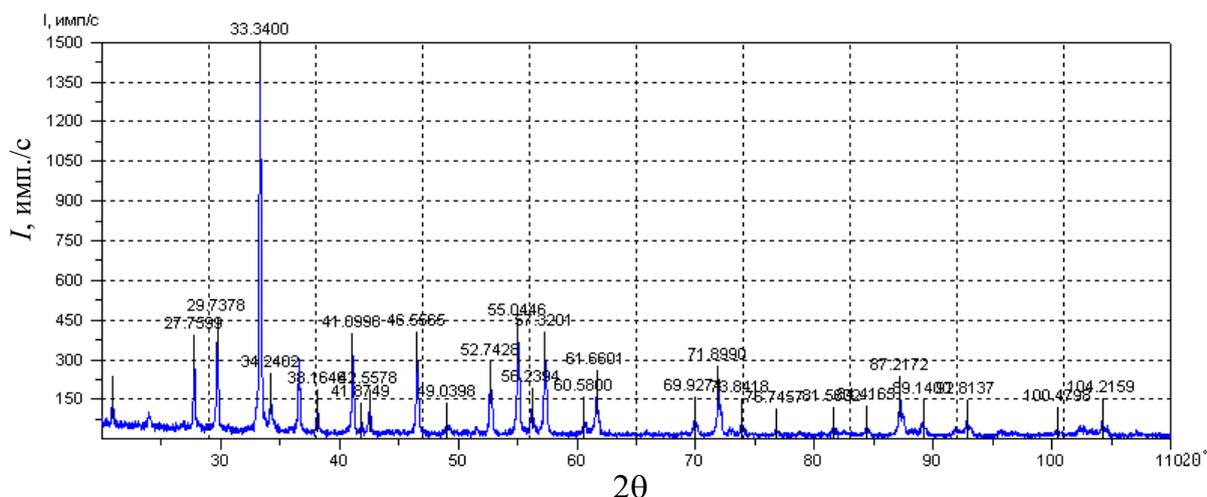


Рисунок 4. – Дифрактограмма YAG:Ce, СВЧ обработка прекурсора

Данные анализа РФА-спектров говорят о том, что в процессе горения в обоих случаях формируется основная кристаллическая фаза – иттрий-алюминиевый гранат  $Y_3Al_5O_{12}$  пространственной группы  $Ia\bar{3}d$  кубической сингонии (карточка PDF № 33-40 по каталогу JCPDS-1996), а пик на  $34,2482^\circ$  принадлежит примесной фазе иттрий-алюминиевого перовскита –  $YAlO_3$  (карточка PDF № 16-219 по каталогу JCPDS-1996), которая формируется при недостатке ионов кислорода.

Для формирования люминесцентной стеклокерамики на основе YAG:Ce в качестве прозрачной матрицы используются легкоплавкие бессвинцовые стекла: висмут-содержащее с  $T_{разм.} = 650^\circ C$   $Bi_2O_3$ - $B_2O_3$ - $ZnO$ - $SiO_2$ - $K_2O$  (ЛС-6) и цинк-кальциевое стекло с  $T_{разм.} = 750^\circ C$   $ZnO$ - $CaO_2$ - $B_2O_3$  (ЛС-2). В качестве диффузно-рассеивающего наполнителя применяли порошки кварцевого стекла с размерами частиц 10-12 и 250-400 мкм.

Образцы для спекания диаметром 30 мм и толщиной от 2 до 5 мм изготавливали путем смешивания компонентов с последующим уплотнением в стальной пресс-форме при давлении 150 МПа на гидравлическом прессе методом одностороннего прессования. Относительную плотность получаемых спеченных образцов стеклокерамики определяли в зависимости от соотношения компонентов, начальной плотности прессовок, температуры и длительности выдержки. Параметры процессов уплотнения, спекания и итоговая плотность образцов приведены в таблице. Спеченные заготовки изучали методами СЭМ, исследовали их плотность, пористость и спектрально-люминесцентные характеристики.

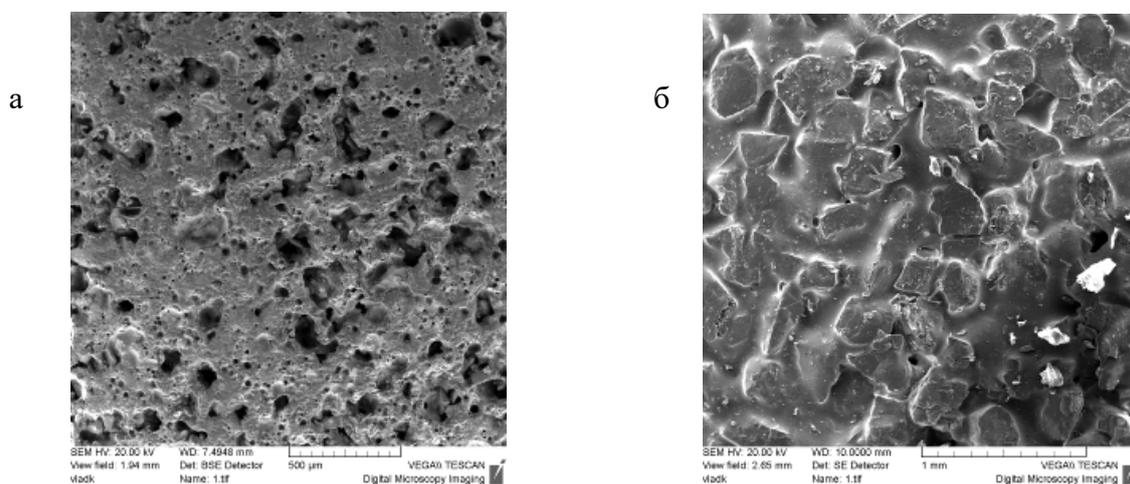
Таблица. – Параметры процессов уплотнения и спекания композитов с наноструктурированными порошками граната, легированного ионами церия

№ обр.	Исходные данные		Условия спекания		Результаты	
	Состав по гранату, мас. %, тип легк. плавк. стекла	Усилие пресса, МПа	Температура, $^\circ C$	Плотность до спекания, $г/см^3$	Плотность после спекания, $г/см^3$	Цвет после спекания
1	30 % YAG:Ce горение в карб. и ГМТА, ЛС-6	150,0	650	0,75 (37 %)	1,92 (82,5 %)	лимонно-желтый
2	15 % YAG:Ce горение в карб. и ГМТА, ЛС-6	То же	650	0,72 (35 %)	1,77 (76,5 %)	лимонно-желтый
3	30 % YAG:Ce горение в сахарозе, ЛС-2 (для сравнения)	То же	750	0,64 (47 %)	1,64 (68 %)	бледно-желтый

Плотность сырых заготовок в форме диска составляла 37-44 % и зависела от состава прессовок. Плотность получаемых образцов спеченных композитов составляла от 75 до 82,5 % от теоретической плотности кварцевого стекла, а пористость достигала 25 %. Таким образом, формируемые композиционные диски представляют собой пористую стеклокерамику, в объеме которой распределены агломераты люминесцентного порошка.

СЭМ-изображение сколов стеклокерамики, полученной с разными светорассеивающими наполнителями, демонстрирует довольно равномерное распределение частиц

кварцевого стекла в объеме образцов (рисунок 5). Причем заметно, что при использовании более тонкого порошка кварца люминофор YAG:Ce, полученный горением в карбамиде и ГМТА (концентрация 30 %), распределен в объеме легкоплавкого стекла (белые области на рисунке 5а), а при введении в состав наполнителя со средним размером зерна 250 мкм люминофор располагается по границам зерен светорассеивающего наполнителя (рисунок 5б).

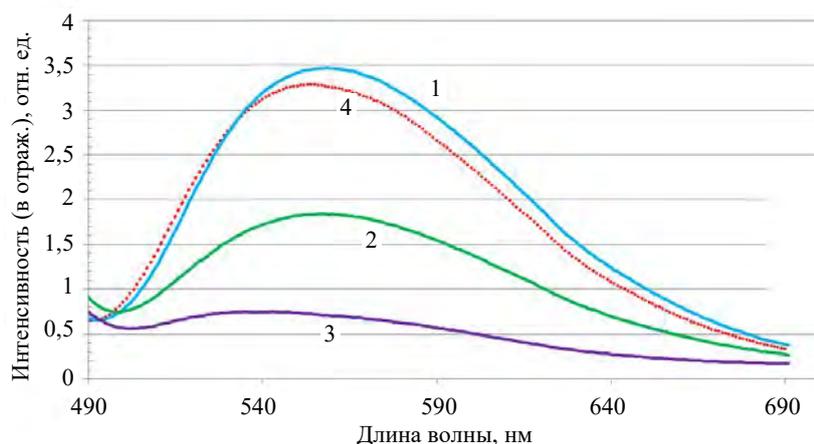


**а** – прессованная стеклокерамика на основе субмикронного порошка YAG:Ce, горение в карбамиде и ГМТА, концентрация 30 %, кварцевый наполнитель 10-12 мкм;  
**б** – тот же состав, но кварцевый наполнитель со средним размером зерна 250 мкм  
**Рисунок 5.** – СЭМ-изображение сколов стеклокерамики, полученной с разными светорассеивающими наполнителями

Полученные композиционные материалы состава «YAG:Ce – SiO<sub>2</sub> – легкоплавкое стекло» люминесцируют с максимумом на длине волны 550 нм (желтое излучение) при возбуждении на длине волны  $\lambda = 455$  нм (синий светодиод), причем наибольшей интенсивностью обладают композиты, сформированные на основе субмикронного порошка YAG:Ce, полученного горением в карбамиде и ГМТА, с концентрацией 30 мас. %. Эффективность люминесценции дисков, полученных с применением 30 % субмикронного порошка YAG:Ce примерно в 5 раз выше, чем с порошком люминофора, синтезированным методом горения в сахарозе и прокаленным при 1100 °С (рисунок 6). Такие композиционные материалы могут быть использованы для светопреобразователей мощных источников излучения белого света с рабочей температурой до 500 °С.

Полимерно-кристаллические оптические композиты формовались горячим прессованием в виде дисков и экструзионным методом в форме ленты.

В качестве прозрачной матрицы для формирования полимерно-кристаллических оптических композитов были использованы: полиэтилен высокого давления ПЭВД, полипропилен порошковый. В качестве люминесцентного материала применялись наноструктурированные порошки иттрий-алюминиевого граната, активированные ионами церия, полученные методом горения в муфельной печи и прокаленные в воздушной среде до 1100 °С. Порошок кристаллического люминофора в композите дисковых образцов составляет 10, 20, 30 % от общей массы (рисунок 7). После термообработки при температуре 140-145 °С и остывания были измерены спектры возбуждения и люминесценции модельных дисковых образцов по стандартной методике.



1 – субмикронный порошок YAG:Ce, горение в карбамиде и ГМТА, концентрация 30 %;  
 2 – то же, что 1, но концентрация YAG:Ce 15 %; 3 – наноструктурированный порошок YAG:Ce, горение в сахарозе

Рисунок 6. – Спектры люминесценции люминофорных дисков относительно эталона (пленка порошка YAG:Ce в прозрачном акриловом лаке – кривая 4)

Спектры возбуждения и люминесценции полученных композитов (1, 2, 3) при длине волны возбуждения 465 нм приведены на рисунке 8.

Полимерно-кристаллические оптические композиты на основе матрицы полиэтилена высокого давления ПЭВД и порошка YAG:Ce<sup>3+</sup>, синтезированного с использованием смеси нитратов иттрия, алюминия и церия и сложного горючего (карбамид и ГМТА), при возбуждении синим светом люминесцируют в широкой полосе в диапазоне 470-750 нм с центром на 550 нм (желто-зеленое излучение). На рисунке 8 приведены спектры возбуждения и люминесценции в зависимости от содержания люминофора.



Рисунок 7. – Полимерно-кристаллические оптические композиты на основе матрицы полиэтилена высокого давления ПЭВД и порошка YAG:Ce

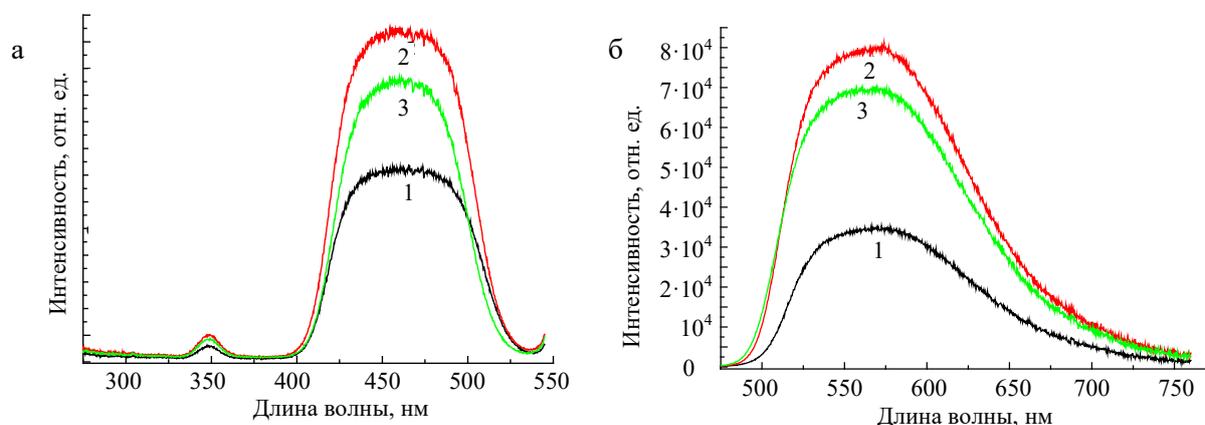


Рисунок 8. – Спектры возбуждения (а) и люминесценции (б) образцов 1-3

Увеличение концентрации порошка YAG:Ce от 10 до 20 мас. % приводит к росту интенсивности примерно в 2,5 раза. Дальнейшее увеличение степени наполнения полимера люминофором нецелесообразно, т.к. приводит к уменьшению интенсивности излучения (кривая 3), по-видимому, за счет повышения агломерации порошков и концентрационного тушения.

Отличительной особенностью полимерно-кристаллического материала является возможность формования люминофорного изделия также в виде ленты, получаемой экструзионным методом (экструдер одношнековый HAAKE RHEOCORD 90 (Германия) (рисунок 9). В качестве прозрачной матрицы для процесса экструзии были использованы: полипропилен порошковый, низкоплотный полиэтилен высокого давления ПЭВД, в качестве прозрачного светорассеивающего наполнителя применяли волластонит микрокристаллический, игольчатый МИВОЛЛ (Россия). Концентрация порошка YAG:Ce в обоих случаях составляла 20 мас. %.

Во втором случае (композит ПП-ПЭВД-YAG:Ce с добавками алюминатного совмещающего агента и лубриканта – воска полиэтиленового) формировались более однородные люминесцирующие ленты с равномерным распределением порошка YAG:Ce в объеме матрицы, а сами частицы порошка менее агломерированы.

С использованием модельных дисковых образцов были изготовлены макеты осветительных приборов с полимерно-кристаллическими преобразователями света.

Макет прибора с круглым фотолюминесцентным преобразователем состоит из блока питания и трех светодиодов синего цвета излучения с длиной волны излучения 470 нм. При включении светильника синее излучение светодиодов возбуждает в полимерно-кристаллическом преобразователе желто-зеленую люминесценцию, а суммарное излучение светильника воспринимается глазом как яркий белый свет (рисунок 10).



**1 – с добавкой игольчатого волластонита МИВОЛЛ; 2 – с добавками алюминатного агента и лубриканта (воск полиэтиленовый)**  
**Рисунок 9. – Ленточные композиты ПП-ПЭВД-YAG:Ce, полученные методом экструзии**



**Рисунок 10. – Макет светодиодного светильника с круглым полимерно-кристаллическим светопреобразователем**

Таким образом, можно констатировать, что оптические полимерно-кристаллические композиционные материалы, наполненные порошком иттрий-алюминиевого граната, легированного ионами церия, люминесцируют с максимумом на длине волны 550 нм (желто-зеленое излучение) при возбуждении на длине волны  $\lambda = 460-470$  нм, и могут

быть использованы для создания светопреобразователей плоских источников белого света большой площади, возбуждаемых матрицами светодиодов синего цвета излучения.

### Выводы

1. Разработаны новые варианты термохимического синтеза ультрадисперсных порошков иттрий-алюминиевого граната, легированного ионами церия (желтого люминофора) в муфельной или СВЧ-печи для наполнения полимерных или стекломатериалов. Установлено, что размеры первичных частиц (средний размер области когерентного рассеяния) составляют  $D_1 \approx 45,3$  нм – для порошка YAG:Ce, полученного горением в муфельной печи, и  $D \approx 50,3$  нм для порошка, полученного в СВЧ-печи.

2. Показано, что эффективность люминесценции стеклокерамических дисков, сформированных с наполнением 30 мас. % субмикронного порошка YAG:Ce, синтезированного горением азотнокислых солей в смеси карбамида и ГМТА, примерно в 5 раз выше, чем с порошком люминофора, синтезированным методом горения в сахарозе. Такие композиционные материалы могут быть использованы для светопреобразователей мощных источников излучения белого света, с рабочей температурой до 500 °С.

3. Полимерно-кристаллические оптические композиты также формовали горячим прессованием в виде дисков и экструзионным методом в форме ленты. В качестве прозрачной матрицы для процесса экструзии были использованы: полипропилен порошковый ПП (Бельгия), низкоплотный полиэтилен высокого давления ПЭВД (Россия), в качестве прозрачного светорассеивающего наполнителя применяли игольчатый волластонит МИВОЛЛ (Россия).

4. С использованием добавки алюминатного агента и лубриканта (полиэтиленового воска) формировались оптические композиты ПП-ПЭВД-YAG:Ce в виде ленты с равномерным распределением люминесцентного порошка в объеме матрицы, а частицы порошка менее агломерированы.

5. Полученные оптические полимерно-кристаллические композиционные материалы люминесцируют с максимумом на длине волны 550 нм (желто-зеленое излучение) при возбуждении на длине волны  $\lambda = 460-470$  нм (синий светодиод), а суммарное излучение от композита демонстрирует яркий белый свет. Такие композиционные материалы могут быть использованы для создания плоских источников белого света большой площади.

### Список использованных источников

1. Kitai, A. Luminescent Materials and Applications / A. Kitai. – John Wiley & Sons, Ltd, 2008. – 374 p.

2. Подденежный, Е.Н. Классификация способов получения ультрадисперсных оксидных порошков (обзор) / Е.Н. Подденежный, А.А. Бойко // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П.О. Сухого. – 2003. – № 1. – С. 21-28.

3. Серова, В.Н. Нанокompозиты на основе прозрачных полимеров / В.Н. Серова // Вестник Казанского технологического университета. – 2010. – № 9. – С. 221-227.

4. Полупроводниковая лампа – источник освещения, альтернативный лампам накаливания и электролюминесцентным лампам / В.Н. Гридин [и др.] // Компьютерная оптика. – 2008. – Т. 32, № 4. – С. 375-383.

5. Полимерная люминесцентная композиция для получения белого света, возбуждаемая синим светодиодом: пат. 2405804 РФ, МПК С09К11/80, С09К11/78,

С09К11/02, С08К3/18 / Т.К. Лазарева, Т.И. Андреева, В.С. Осипчик; заявитель ОАО «Институт пластмасс им. Г.С. Петрова»; заявл. 22.07.09; опубл. 10.12.10.

6. High Performance Flexible Phosphor Sheet [Electronic resource] // Phosphor Tech Corporation. – Mode of access: <http://www.phosphortech.com/RadiantFlex.php>. – Date of access: 07.08.12.

7. Fu, Y.-P. Preparation of  $Y_3Al_5O_{12}:Ce$  powders by microwave-induced combustion process and their luminescent properties / Y.-P. Fu // Journal of Alloys and Compounds. – 2006. – Vol. 414, № 1-2. – P. 181-185.

8. Microwave induced solution combustion synthesis of nano-sized phosphors / Z. Chen [etc.] // Journal of Alloys and Compounds. – 2009. – Vol. 473. – P. L13-L16.

9. Грег, С. Адсорбция, удельная поверхность, пористость / С. Грег, К. Синг. – М.: Мир, 1970. – 407 с.

---

**Davydova O.V., Drobyshevskaya N.E., Poddenezhny E.N, Boiko A.A., Pavlenok A.V., Shapovalov V.M.**

**Optical composites based on ultrafine powders of yttrium-aluminum garnet activated by cerium ions**

*The new variants of thermo-chemical synthesis of yttrium-aluminum garnet ultra dispersed powders doped with cerium ions (yellow phosphor) for utilization in optical composites are developed. It is established that the size of the primary particles of YAG:Ce (medium size region of coherent scattering) are  $D_1 \approx 45,3$  nm for the powder obtained by combustion in a muffle furnace and  $D_2 \approx 50,3$  nm for the powder obtained in the microwave. The glass-ceramics and polymer-crystal optical composites are prepared on the basis of these powders with improved luminescent properties.*

Keywords: optical composites, ultrafine powders, yttrium aluminum garnet, activation, cerium ions.

Поступила в редакцию 29.11.2017 г.

Перечень статей, опубликованных в журнале  
«Горная механика и машиностроение» в 2017 году

№ 1

**ГЕОТЕХНОЛОГИЯ**

- Турко М.Р., Белькевич Т.И., Соловьева Л.А., Коратченя Т.Н.** Исследование влияния качества руды на извлечение хлористого калия в концентрат ..... 5

**МАШИНОСТРОЕНИЕ**

- Данилов В.А., Киселев Р.А., Яловский О.В.** Совершенствование технологии обработки зубчатого контура на торцах кольцевых деталей ..... 12
- Павлечко В.Н., Казаченко Г.В.** Зависимость параметров осевой турбины от угла наклона лопастей ..... 22
- Березовский Н.И., Борисейко В.В.** Энергосберегающие аспирационные системы паротрубчатых сушилок для производства топливных брикетов ..... 31
- Довгалец А.М., Леванович Н.А., Тарадейко И.А.** Динамическая модель процесса совмещенного магнитно-центробежного накатывания ..... 37
- Гавриков А.А., Волчек О.М., Казаченко Г.В.** Некоторые параметры планетарно-дискового исполнительного органа проходческого комбайна ..... 49

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

- Лиопо В.А., Овчинников Е.В., Сабуть А.В.** Координационные полиэдры алмазных нанокристаллов ..... 54
- Антонов А.С., Авдейчик С.В., Струк В.А., Абдуразаков А.А.** Структурный фактор технологии смесевых композитов ..... 65
- Авдейчик С.В., Сорокин В.Г., Струк В.А., Антонов А.С., Икромов А.Г., Абдуразаков А.А.** Методология выбора функциональных модификаторов для композитов на основе высокомолекулярных матриц ..... 76

№ 2

**ГЕОТЕХНОЛОГИЯ**

- Губанов В.А., Пузанов Д.А., Мозговенко М.С., Ерохин К.А., Подлесный И.А., Петровский А.Б., Долгих А.С.** Исследование проявлений горного давления в подготовительных и очистных выработках при выемке подработанных и оставленных запасов в IV сильвинитовом слое и междустолбовом целике опытной лавой № 11-3 горизонта – 620 м рудника 3 РУ ОАО «Беларуськалий» ..... 5
- Оника С.Г., Кузьмич А.К.** Комплексный метод построения паспорта прочности горной породы ... 19
- Халывкин Ф.Г., Оника С.Г., Вересович С.А.** Фильтрационные расчеты при вертикальном дренаже месторождений строительных материалов ..... 26

**МАШИНОСТРОЕНИЕ**

- Макаревич Д.М., Макаревич С.Д.** Анализ кулисного механизма двигательного привода токоразъединителей ..... 31

<b>Павлечко В.Н.</b> Параметры осевой турбины при закручивании входного потока .....	41
<b>Вайтехович П.Е., Гребенчук П.С., Таболич А.В., Верховодко А.А.</b> Влияние конструктивных особенностей ротора на скорость измельчаемого материала в центробежно-ударных дробилках .....	54
<b>Матвеев Д.С., Асадчев А.С.</b> Исследование надежности и долговечности термостойких винтовых забойных двигателей при бурении сверхглубоких скважин .....	64
<b>Иванов В.П., Семенов В.И.</b> Проектирование процессов и средств технологического оснащения ремонтного производства .....	73

### **МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

<b>Бочкарев Д.И., Петрусевич В.В., Валенков А.М.</b> Использование метода ИК-спектроскопии для идентификации отходов нефтехимического производства .....	84
<b>Шаповалов В.М., Валенков А.М., Злотников И.И.</b> Исследование структуры и свойств МДО-покрытий, модифицированных ионами переходных металлов .....	90

## **№ 3**

### **ГЕОТЕХНОЛОГИЯ**

<b>Журавков М.А., Коновалов О.Л., Богдан С.И., Хвесеня С.С., Денкевич Э.Т.</b> Организация мониторинга деформаций земной поверхности и инженерных сооружений в регионе отработки месторождений калийных солей Беларуси на основе методов дифференциальной спутниковой интерферометрии с использованием активных отражателей .....	5
<b>Казаченко Г.В., Нагорский А.В., Ярмолинский В.К.</b> Математическая модель установившегося процесса горизонтального шнекового бурения .....	19
<b>Кологривко А.А., Голдаев А.В., Голдаев В.А.</b> Особенности распределения величин оседаний земной поверхности при повторной подработке .....	27
<b>Поляков А.Л., Мисников В.А., Лутович Е.А., Ерохин К.А.</b> Поддержание выработок Старобинского калийного месторождения с помощью специальных видов крепи. Часть 1. Адаптация конструкции существующих анкеров повышенной несущей способности к местным условиям .....	37

### **МАШИНОСТРОЕНИЕ**

<b>Громько П.Н., Хатетовский С.Н., Трусов И.В., Макаревич С.Д.</b> Расширение возможностей прецессионной передачи путем реализации ею функции компенсирующей муфты .....	46
<b>Павлечко В.Н.</b> О работе радиальной турбины при вводе закрученного потока .....	52
<b>Лобко В.В.</b> Моделирование системы управления измельчительного комплекса при производстве минеральных удобрений .....	65

### **МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

<b>Шаповалов В.М., Тимошенко В.В., Злотников И.И., Тартаковский З.Л., Пантюхов О.Е., Талецкий В.В.</b> Влияние высокодисперсных метасиликатов на свойства полимеров .....	70
<b>Павленко А.П., Ахраменко Н.А.</b> Формование изделий из алюмооксидной керамики .....	77
<b>Авдейчик С.В., Антонов А.С., Струк В.А., Воронцов А.С.</b> Реализация принципа многоуровневого модифицирования в материаловедении и технологии полимерных композитов .....	86

№ 4

Памяти Владимира Яковлевича Щербы ..... 5

**ГЕОТЕХНОЛОГИЯ**

Гец А.К., Крук Ю.С., Остапук М.И., Омшарук А.С. Компьютерное моделирование процесса динамического управления качеством руды на калийном руднике ..... 7

Прушак В.Я. Повышение эффективности добычи и переработки горно-минерального сырья на основе инновационного развития ..... 14

Кофанов А.Е., Холковский Ю.Р. Геоэкологические аспекты моделирования локального загрязнения приземного атмосферного воздуха отработавшими газами автотранспортных средств ..... 20

**МАШИНОСТРОЕНИЕ**

Вайтехович П.Е. Модель истирающего воздействия измельчаемого материала на лопасти ротора ударно-центробежной мельницы ..... 34

Пашкевич В.М. Компьютерное управление сборкой гипоидных передач ..... 40

Павлечко В.Н. О влиянии центробежной силы на работу радиальной турбины при вводе закрученного потока ..... 51

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

Овчинников Е.В., Лиопо В.А., Эйсымонт Е.И., Рискулов А.А., Елкин А.И. Особенности технологии получения тонкослойных покрытий на поверхности твердых тел ..... 64

Шевчук В.В., Островский Л.К., Поткина Т.Н., Войтенко А.И. Изучение минерального состава фосфоритовых концентратов как сырья для кислотной переработки ..... 73

Давыдова О.В., Дробышевская Н.Е., Подденежный Е.Н., Бойко А.А., Павленок А.В., Шаповалов В.М. Оптические композиты на основе ультрадисперсных порошков иттрий-алюминиевого граната, активированного ионами церия ..... 82

A list of articles that have been published in the journal  
«Mining mechanical engineering and machine-building» in 2017

№ 1

**GEOTECHNOLOGY**

Turko M.R., Bialkevich T.I., Salauyova L.A., Koratchenya T.N. Research of impact of the ore quality on extraction of potash chloride into concentrate ..... 5

**MACHINE-BUILDING**

Danilov V.A., Kiselev R.A., Yalovsky O.V. Improvement of the technology of gear processing on end surfaces of ring-shaped elements ..... 12

Pavlechko V.N., Kazachenko G.V. The dependence of axial flow turbine parameters from the blade angle ..... 22

Berezovsky N.I., Boriseyko V.V. Energy-saving dust-exhaust systems of steam-tube driers for the production of fuel briquettes ..... 31

<b>Dovgalev A.M., Levanovich N.A., Taradeiko I.A.</b> Dynamic model of centrifugal combined magnetic centrifugal rolling process .....	37
<b>Gavrikov A.A., Volchek O.M., Kozachenko G.V.</b> Some parameters of planetary-disk executive body of a roadheading machine .....	49

**MATERIALS ENGINEERING**

<b>Liopo V.A., Auchynnikau Y.V., Sabut A.V.</b> The coordination polyhedrons of diamond crystals ....	54
<b>Antonov A.S., Avdejchik S.V., Struk V.A., Abdurazakov A.A.</b> Structural factor of blend composites technology .....	65
<b>Avdejchik S.V., Sarokin V.G., Struk V.A., Antonov A.S., Ikromov A.G., Abdurazakov A.A.</b> The methodology of the choice of functional modifiers for high-molecular matrices composites .....	76

**№ 2****GEOTECHNOLOGY**

<b>Gubanov V.A., Puzanov D.A., Mozgoenko M.S., Erokhin K.A., Podlesnyi I.A., Petrovsky A.B., Dolgikh A.S.</b> Investigation of rock pressure manifestations in development and production workings by mining of underworked and abandoned reserves in the IV sylvinitic layer and inter-panel pillar of the experimental longwall face № 11-3 on the horizon –620 m of the Third mine group of JSC “Belaruskali” .....	5
<b>Onika S.G., Kuzmich A.K.</b> Comprehensive method of plotting of a rock strength certificate .....	19
<b>Khalyavkin F.G., Onika S.G., Veresovich S.A.</b> Calculations of filtration during the vertical drainage of deposits of building materials .....	26

**MACHINE-BUILDING**

<b>Makarevich D.M., Makarevich S.D.</b> Analysis of the power drive rocker for current disconnectors ...	31
<b>Pavlechko V.N.</b> Parameters of an axial-flow turbine in a swirl flow .....	41
<b>Vaitekhovich P.E., Grebenchuk P.S., Tabolich A.V., Verhovodko A.A.</b> Influence of rotor design features on material speed in a centrifugal impact crushers .....	54
<b>Matveenko D.S., Asadchev A.S.</b> Research of reliability and durability of heat-resistant screw bottomhole engines by drilling super-deep wells .....	64
<b>Ivanov V.P., Semenov V.I.</b> Design of processes and tools of technological equipment of maintenance production .....	73

**MATERIALS ENGINEERING**

<b>Bochkarev D.I., Petrushevich V.V., Valenkov A.M.</b> Use of IR spectroscopy method for identification of waste of petrochemical production .....	84
<b>Shapovalov V.M., Valenkov A.M., Zlotnikov I.I.</b> Investigation of microarc oxidation coatings modified by ions of transition metals .....	90

**№ 3****GEOTECHNOLOGY**

<b>Zhuravkov M.A., Kanavalau A.L., Bogdan S.I., Hvesenya S.S., Denkevich E.T.</b> Monitoring of the land surface deformations and engineering constructions in the area of mining of Belarus potash salts deposit on the basis of differential satellite interferometry methods with the use of active reflectors .....	5
<b>Kazachenko G.V., Nagorsky A.V., Yarmolinsky V.K.</b> Mathematical model of the steady process of horizontal auger drilling .....	19

<b>Kologrivko A.A., Goldaev A.V., Goldaev V.A.</b> Specific aspects of the distribution of the value of the earth surface subsidence by the repeated underworking .....	27
<b>Polyakov A.L., Misnikov V.A., Lutovich E.A., Erokhin K.A.</b> Maintaining of Starobin potash deposit workings using special types of the support. Part 1. Requirements for maintaining of the workings using increased bearing capacity anchors .....	37

**MACHINE-BUILDING**

<b>Gromyko P.N., Hatetovskii S.N., Trusov I.V., Makarevich S.D.</b> Expanding of possibilities of precession transfer by implementing the compensating coupling function .....	46
<b>Pavlechko V.N.</b> Functioning of the radial-flow turbine with whirling input flow .....	52
<b>Labko V.W.</b> Mathematical modeling of ore crushing control system by the potash fertilizers manufacturing .....	65

**MATERIALS ENGINEERING**

<b>Shapovalov V.M., Timoshenko V.V., Zlotnikov I.I., Tartakovskiy Z.L., Pantiukhov O.E., Taletsky V.V.</b> Effect of highly dispersed metasilicates on the properties of polymers .....	70
<b>Pavlenko A.P., Akhramenko N.A.</b> Molding of alumina ceramics products .....	77
<b>Avdeychik S.V., Antonov A.S., Struk V.A., Vorontsov A.S.</b> Realization of the multilevel modification principle in materials science and technology of polymer composites .....	86

**№ 4**

<b>Devoted to the memory of Vladimir Yakovlevich Shcherba .....</b>	5
---	---

**GEOTECHNOLOGY**

<b>Gets A.K., Kruk Yu.S., Ostapuk M.I., Omsharuk A.S.</b> Computer modelling of the process of dynamic quality management of potash ore at the mine .....	7
<b>Prushak V.Ya.</b> Improving the efficiency of mining and processing mining of mineral raw materials on the basis of innovative development .....	14
<b>Kofanov O., Kholkovskiy Yu.</b> Geocological aspects of modeling of local pollution of surface atmospheric air by exhaust gases of motor vehicles .....	20

**MACHINE-BUILDING**

<b>Vaitekhovich P.E.</b> Model of grinding action of the material to be crushed on the rotor blades of the impact-centrifugal mill .....	34
<b>Pashkevich V.M.</b> Computer control of assembly of hypoid gears .....	40
<b>Pavlechko V.N.</b> Effect of centrifugal force on performance of the radial-flow turbine with swirling flow at the inlet .....	51

**MATERIALS ENGINEERING**

<b>Auchynnika Yu.V., Liopo V.A., Eisymont Ya.I., Riskulov A.A., Elkin A.I.</b> Features of the technology of thin-layer coatings on the surface of solid bodies .....	64
<b>Shevchuk V.V., Astrouski L.K., Potkina T.N., Vaitenka A.I.</b> The study of the phosphate concentrates mineralogical makeup for acid processing .....	73
<b>Davydova O.V., Drobyshevskaya N.E., Poddenezhny E.N., Boiko A.A., Pavlenok A.V., Shapovalov V.M.</b> Optical composites based on ultrafine powders of yttrium-aluminum garnet activated by cerium ions .....	82

**Уважаемый рецензент, при написании рецензии просьба руководствоваться следующими рекомендациями:**

1. Соответствие статьи выбранному научному направлению: геотехнология, материаловедение или машиностроение.
2. Актуальность темы, новизна полученных результатов, их научная и практическая значимость, достоверность в сопоставлении с соответствующими известными данными.
3. Логика изложения и четкость формулировок.
4. Информативность и качество иллюстрированного материала.
5. Полнота списка литературы, наличие публикаций последних лет и зарубежных публикаций в данной области.
6. Соответствие аннотации тексту статьи.
7. Текст и количество иллюстрированного материала нуждается в сокращении или нет.
8. В качестве вывода просим указать мнение о возможности публикации статьи после исправлений (без исправлений) или необходимо повторное рецензирование после серьезных исправлений.

Статьи, направленные в редакцию журнала, должны удовлетворять требованиям «Инструкции о порядке оформления квалификационной научной работы (диссертации) на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук, автореферата и публикаций по теме диссертации», утвержденной Постановлением Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь № 3 от 28.02.2014.

1. Статья должна быть представлена в распечатанном и в электронном виде, должна иметь разрешение на опубликование, сопроводительное письмо.
2. Поступившие в редакцию статьи проходят рецензирование. Основные критерии целесообразности опубликования – актуальность тематики, научная новизна, значимость результатов.
3. Объем научной статьи по теме диссертации должен составлять не менее 14000 печатных знаков, включая пробелы, (примерно 5-6 страниц).
4. Статья должна быть представлена в формате текстового редактора Microsoft Word. Шрифт текста Times New Roman, размер 12 п., интервал – 1.
5. В статье должны быть указаны индекс УДК, название статьи, фамилии и инициалы авторов (число авторов – не более 5), полные наименования учреждений, где работают авторы. Статья должна содержать: аннотацию (до 10 строк), ключевые слова (до 10), введение, основную часть, заключение, завершаемое четко сформулированными выводами, список использованных источников. Аннотация, название статьи, ключевые слова, а также фамилии авторов должны быть представлены на английском и русском языках.
6. Таблицы и рисунки располагаются непосредственно в тексте статьи. Количество рисунков и таблиц не должно превышать 8. Рисунки должны быть четкими и созданы в одном из графических редакторов (формат jpg, tif, pcx, bmp, gif, cdr, wmf, psd). Каждая таблица должна иметь заголовок, а рисунок – подписанную надпись. На все таблицы и рисунки следует давать ссылки в тексте.
7. Формулы должны быть созданы в редакторе «Math Type». Все обозначения, приведенные в статье, расшифровываются непосредственно в тексте, кроме того, могут быть вынесены на отдельную страницу.
8. Не следует употреблять сокращения, кроме общепринятых.
9. Оформление списка использованных источников должно соответствовать требованиям ГОСТ 7.1-2003. Список должен быть составлен в порядке упоминания ссылок в тексте. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. Список должен содержать зарубежные публикации в данной области (при их наличии).
10. Авторам необходимо на отдельной странице предоставить следующие сведения: фамилия, имя, отчество полностью, место работы на русском и английском языках, адрес организации и электронной почты каждого автора, почтовый адрес для переписки, номера телефонов.

1. The article should be presented in printed out and electronic forms, should have a security clearance, a covering letter.
2. Received articles are reviewed. The main criteria of feasibility of the publication are the subject relevance, the scientific novelty, the significance of results.
3. The volume of scientific article on the topic of thesis research must be at least 14,000 typographical units, including spaces, (approximately 5-6 pages).
4. The article should be presented in the text editor Microsoft Word format. The font is Times New Roman, font size is 12, interval – 1.
5. The UDC number, the article's title, the authors' surnames and initials (number of authors – maximum 5), full names of organizations where the authors work should be included in the article. The article should contain: the summary (up to 10 lines), keywords (up to 10), the introduction, the article's body, the conclusion finished by clearly formulated findings, and the list of cited references. The summary, the article's title, keywords as well as the authors' surnames should be presented in English and Russian languages.
6. Tables and figures are placed directly in the article text. The number of figures and tables should not exceed 8. The figures should be well-defined and should be created in one of graphic editors (jpg, tif, pcx, bmp, gif, cdr, wmf, psd format). Each table should have a title, and each figure – a picture caption. All tables and figures should have references in the text.
7. Formulae should be created in the «Math Type» editor program. All symbols given in the article are deciphered directly in the text; in addition the symbols may be published on a separate page.
8. Abbreviations should not be used, except commonly used abbreviations.
9. Presentation of references must comply with the requirements of GOST 7.1-2003. The list should be made in order as the references are mentioned in the text. The references to unpublished works are not allowed. The list should include foreign publications in this sphere (if available).
10. The authors should provide the following information on a separate page: the surname, the first name, the patronymic name, the postal address for correspondence, the place of work and the position, phone numbers, e-mail address.



Подписные 749332  
индексы: 74933

**Основные направления научно-исследовательской деятельности  
ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством»:**

- совершенствование технологий добычи и повышение безопасности ведения горных работ на месторождениях полезных ископаемых;
- моделирование и автоматизированное проектирование горных машин, работающих на глубине более 1000 м во взрывоопасной среде и при больших давлениях кровли;
- разработка горно-шахтного подъемно-транспортного оборудования;
- разработка горного проходческого, очистного и бурового оборудования;
- разработка технологического горно-обогачительного оборудования;
- разработка методов повышения надежности и долговечности деталей и узлов машин, работающих в условиях абразивных, химически активных сред горно-обогачительных предприятий;
- разработка оборудования для комплексов по перегрузке и складированию сыпучих материалов;
- разработка высокопроизводительных технологий обогащения полезных ископаемых;
- разработка композиционных и теплозвукоизоляционных материалов;
- разработка конструкционных материалов и покрытий, предназначенных для использования в агрессивных химически активных, абразивных средах предприятий горной промышленности;
- разработка автоматизированных систем управления горно-шахтным добывающим и перерабатывающим оборудованием.

**Адрес редакции:**

ул. Козлова, 69  
223710, г. Солигорск,  
Республика Беларусь,

ISSN 1728-3841



**Телефоны:**

(+375 174) 26 28 37    главный редактор (приемная)

(+375 174) 26 35 32    ответственный секретарь

E-mail: [onti@sipr.by](mailto:onti@sipr.by)

<http://www.sipr.by>