



Sumy State University
<http://jes.sumdu.edu.ua>

ISSN: 2312-2498

ЖУРНАЛ ИНЖЕНЕРНЫХ НАУК

**JOURNAL
of ENGINEERING
SCIENCES**

**ЖУРНАЛ
ИНЖЕНЕРНЫХ
НАУК**

**02
2015**

Міністерство освіти і науки України

The Ministry of Education and Science of Ukraine

Министерство образования и науки Украины

ЖУРНАЛ ІНЖЕНЕРНИХ НАУК

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

ЖУРНАЛ ИНЖЕНЕРНЫХ НАУК

Науковий журнал

Scientific Journal

Научный журнал

Том 2, № 2 (2015)

Заснований у 1994 році

Founded in 1994

Основан в 1994 году

Сумський державний університет

Sumy State University

Сумский государственный университет

Журнал публікує статті, що висвітлюють актуальні питання сучасного високотехнологічного виробництва, розвитку нових наукових течій у техніці та розроблення технологій майбутнього, підготовлені професорсько-викладацьким складом, аспірантами та фахівцями університету та інших ВНЗ, а також вченими і спеціалістами інших наукових установ. Для викладачів ВНЗ, наукових працівників, аспірантів, конструкторів та виробників.

ISSN 2312-2498

Рекомендовано до друку
вченою радою Сумського державного університету,
(протокол № 4 від 10.12.2015 року)

Журнал є науковим фаховим виданням ВАК України у галузі технічні науки (Наказ МОН України від 13.07.2015 № 747 «Про затвердження рішень Атестаційної колегії Міністерства щодо діяльності спеціалізованих вчених рад від 30 червня 2015 року». – Режим доступу: <http://old.mon.gov.ua/img/zstored/files/747.rar>).

Публікується за підтримки:

факультету технічних систем та енергоефективних технологій
Сумського державного університету:
<http://teset.sumdu.edu.ua/>

кафедри комп'ютерних наук
Сумського державного університету:
<http://cs.sumdu.edu.ua/>

ТОВ «Сумитеплоенерго»:
<http://teplo.sumy.ua/>

| | |
|------------------------------------|---|
| Адреса редакційної колегії: | вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007 |
| Телефони: | (+38 0542) 68-78-52, (+38 0542) 33-41-09 |
| Електронна адреса: | jes.sumdu@gmail.com |
| Web-site: | http://jes.sumdu.edu.ua/ |

Свідоцтво про Державну
реєстрацію друкованого засобу масової інформації
КВ № 20499-10299 ПР від 11.12.2013



РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР

Криворучко Д. В., д-р техн. наук, доцент (Сумський державний університет, м. Суми, Україна).

РЕДАКТОР-КОНСУЛЬТАНТ

Марцінковський В. А., д-р техн. наук, професор (Сумський державний університет, м. Суми, Україна).

ЗАСТУПНИКИ ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА

Залого В. О., д-р техн. наук, професор (Сумський державний університет, м. Суми, Україна);
Ковальов І. А., канд. техн. наук, професор (Сумський державний університет, м. Суми, Україна);
Склябінський В. І., д-р техн. наук, професор (Сумський державний університет, м. Суми, Україна);
Гусак О. Г., канд. техн. наук, доцент (Сумський державний університет, м. Суми, Україна).

ВІДПОВІДАЛЬНИЙ РЕДАКТОР

Івченко О. В., канд. техн. наук, доцент (Сумський державний університет, м. Суми, Україна).

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ

Пляцук Л. Д., д-р техн. наук, професор (Сумський державний університет, м. Суми, Україна);
Симоновський В. І., д-р техн. наук, професор (Сумський державний університет, м. Суми, Україна);
Дядюра К. О., д-р техн. наук, доцент (Сумський державний університет, м. Суми, Україна);
Верещака С. М., д-р техн. наук, професор (Сумський державний університет, м. Суми, Україна);
Карінцев І. Б., канд. техн. наук, професор (Сумський державний університет, м. Суми, Україна);
Петраков Ю. В., д-р техн. наук, професор (Національний технічний університет України «КПІ», м. Київ, Україна);
Федорович В. А., д-р техн. наук, професор

EDITORIAL BOARD

EDITOR – IN – CHIEF

Kryvoruchko D. V., Doctor of Engineering Sciences, A. P. (Sumy State University, Sumy, Ukraine).

ADVISORY EDITOR

Martsinkovskiy V. A., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Sumy State University, Sumy, Ukraine).

DUPUTY CHIEF EDITORS

Zaloga V. O., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Sumy State University, Sumy, Ukraine);
Kovalev I. O., Candidate of Sciences (Engineering), Professor (Sumy State University, Sumy, Ukraine);
Sklyabinskiy V. I., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Sumy State University, Sumy, Ukraine);
Gusak O. G., Candidate of Sciences (Engineering), A. P. (Sumy State University, Sumy, Ukraine).

ASSOCIATE EDITOR

Ivchenko O. V., Candidate of Sciences (Engineering), A. P. (Sumy State University, Sumy, Ukraine).

MEMBERS OF EDITORIAL BOARD

Plyatsuk L. D., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Sumy State University, Sumy, Ukraine);
Simonovskiy V. I., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Sumy State University, Sumy, Ukraine);
Dyadyura K. O., Doctor of Engineering Sciences, A. P. (Sumy State University, Sumy, Ukraine);
Vereshchaka S. M., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Sumy State University, Sumy, Ukraine);
Karintsev I. B., Candidate of Sciences (Engineering), Professor (Sumy State University, Sumy, Ukraine);
Petraikov Yu. V., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Ukrainian National Technical University "KPI", Kiev, Ukraine);
Fedorovich V. A., Doctor of Engineering Sciences,

- (Харківський національний технічний університет «ХПІ», м. Харків, Україна);
- Мазур Н. П., д-р техн. наук, професор (Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, Україна);
- Сторчак М. Г., д-р техн. наук, професор (Інститут верстатів Університету Штутгарта, м. Штутгарт, Німеччина);
- Кушнер В. С., д-р техн. наук, професор (Омський державний технічний університет, м. Омськ, Росія);
- Верещака А. С., д-р техн. наук, професор (Московський державний технічний університет «Станкін», м. Москва, Росія);
- Клименко С. А., д-р техн. наук, професор (Інститут надтвердих матеріалів ім. В. Н. Бакуля Національної академії наук України, м. Київ, Україна);
- Трищ Р. М., д-р техн. наук, професор (Українська інженерно-педагогічна академія, м. Харків, Україна);
- Віткін Л. М., д-р техн. наук, професор (старший радник Адміністрації Президента України, Навчально-науковий інститут магістерської підготовки та післядипломної освіти Університету «КРОК», м. Київ, Україна);
- Івахненко О. Г., д-р техн. наук, професор (Південно-Західний державний університет, м. Курськ, Росія);
- Отаманюк В. М., д-р техн. наук, професор (Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна);
- Шаповорев В. П., д-р техн. наук, професор (Національний технічний університет «ХПІ», м. Харків, Україна);
- Роман Петрус, д-р техн. наук, професор (Жешувська політехніка, м. Жешув, Польща);
- Камбург В. Г., д-р техн. наук, професор (Пензенський державний університет архітектури та будівництва, м. Пенза, Росія);
- Франчишек Похіпі, д-р техн. наук, професор (Технічний університет Брно, м. Брно, Чехія);
- Міхал Вархола, д-р техн. наук, професор (Словацький технологічний університет у Братиславі, м. Братислава, Словаччина);
- Жарковський А. А., д-р техн. наук, професор (Петербурзький державний політехнічний університет, м. Санкт-Петербург, Росія);
- Соложенцев Е. Д., д-р техн. наук, професор (Санкт-Петербурзький державний університет аерокосмічного приладобудування, м. Санкт-Петербург, Росія);
- Караханьян В. К., д-р техн. наук, професор, (Російська асоціація виробників насосів, м. Москва, Росія);
- Свідерський В. А., д-р техн. наук, професор (Національний технічний університет України «КПІ», м. Київ, Україна);
- Сіренко Г. А., д-р техн. наук, професор (Прикарпатський національний університет ім. Василя Стефаника, м. Івано-Франківськ, Україна);
- Захаренко А. В., д-р техн. наук, професор (ЗАТ «БАРРЕНС», м. Санкт-Петербург, Росія);
- Professor (Kharkov National Technical University “KhPI”, Kharkov, Ukraine);
- Mazur N. P., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Khmeinitzkiy National University, Khmeinitzsk, Ukraine);
- Storchak M. G., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Machine Institute of Stuttgart University, Stuttgart, Germany);
- Kushner V. S., Doctor of Engineering Sciences, Professor (State Technical University, Omsk, Russia);
- Vereshchaka A. S., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Moskov State Technical University “Stankin”, Moskov, Russia);
- Klimenko S. A., Doctor of Engineering Sciences, Professor (V. N. Bakul Institute of super hard materials of the National Academy of sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine);
- Trishch R. M., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Ukrainian engineering and pedagogical Academy, Kharkov, Ukraine);
- Vitkin L. M., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Senior Advisor of the Administration of the President of Ukraine, Educational and scientific Institute of Master’s Programmes and Post-Graduate Education of the “KROK” University, Kiev, Ukraine);
- Ivachnenko A. G., Doctor of Engineering Sciences, Professor (South-west State University, Kursk, Russia);
- Otamanyuk V. M., Doctor of Engineering Sciences, Professor, National University “Lvov Polytechnics”, Lvov, Ukraine);
- Shapovorev V. P., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Kharkov National Technical University “KhPI”, Kharkov, Ukraine);
- Roman Petrus, Doctor of Engineering Sciences, Professor (Zheschuv Polytechnics, Zheschuv, Poland);
- Kamburg V. G., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russia);
- Franchischek Pokhipy, Doctor of Engineering Sciences, Professor (Brno Technical University, Brno, Czech);
- Mikhal Varkhola, Doctor of Engineering Sciences, Professor (Slovak Technological University in Bratislava, Bratislava, Slovakia);
- Zharkovkiy A. A., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Sankt-Petersburg State Polytechnic University, Sankt-Petersburg, Russia);
- Solozhentsev E. D., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Sankt-Petersburg State University of Aerospace Tool-Making, Sankt-Petersburg, Russia);
- Karakhanyan V. K., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Russian Federation of Pump Producers, Moscow, Russia);
- Sviderskiy V. A., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Ukrainian National Technical University “KPI”, Kiev, Ukraine);
- Sirenko G. A., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Vasiliy Stefanik Ciscarpathian National University, Ivano-Frankovsk, Ukraine);
- Zacharenko A. V., Doctor of Engineering Sciences, Professor, (Closed Joint- Stock Company “BARRENS”, Sankt-Petersburg, Russia);

- Павленко В. І., д-р техн. наук, професор (Белгородський державний технологічний університет ім. В. Г. Шухова, м. Белгород, Росія);
- Шаповалов М. А., д-р техн. наук, професор (Белгородський державний технологічний університет ім. В. Г. Шухова, м. Белгород, Росія);
- Колесніков В. І., д-р техн. наук, професор (Ростовський державний університет шляхів сполучення, м. Ростов, Росія);
- Йімінг Кевін Ронг, д-р техн. наук, професор (Вустерський політехнічний інститут, м. Вустер, США);
- Мацевитий Ю. М., д-р техн. наук, професор (Інститут проблем машинобудування Національної академії наук України, м. Харків, Україна);
- Чеслав Кундера, д-р техн. наук, професор (Політехніка Свентокжиська, м. Кельце, Польща);
- Філімоніхін Г. Б., д-р техн. наук, професор (Кіровоградський технічний університет, м. Кіровоград, Україна);
- Львов Г. І., д-р техн. наук, професор (Харківський національний технічний університет «ХПІ», м. Харків, Україна);
- Дзюба А. П., д-р фіз.-мат. наук, професор (Дніпропетровський національний університет, м. Дніпропетровськ, Україна);
- Шубенко А. Л., д-р техн. наук, професор (Інститут проблем машинобудування Національної академії наук України, м. Харків, Україна);
- Гадяка В. Г., канд. техн. наук (Публічне акціонерне товариство «Сумське машинобудівне науково-виробниче об'єднання ім. М. В. Фрунзе», м. Суми, Україна);
- Йозеф Заєць, д-р техн. наук, професор (Технічний університет, м. Кошице, Словаччина);
- Карпусь В. Е., д-р техн. наук, професор (Академія внутрішніх військ МВС України, м. Харків, Україна).
- Pavlenko V. I., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Shukhov Belgorod State Technological University, Belgorod, Russia);
- Shapovalov M. A., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Shukhov Belgorod State Technological University, Belgorod, Russia);
- Kolesnikov V. I., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Rostov State University of Communications, Rostov, Russia);
- Yiming Kevin Wrong, Doctor of Engineering Sciences, Professor (Worcester Polytechnic University, Worcester, USA);
- Matsevityi Yu. M., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Institute of Machine- Building Problems of The National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkov, Ukraine);
- Cheslav Kundera, Doctor of Engineering Sciences, Professor (Polytechnica Sventokzhiska, Keltse, Poland);
- Filimonikhin G. B., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Kirovograd Technical University, Kirovograd, Ukraine);
- Lvov G. I., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Kharkov National Technical University "KhPI", Kharkov, Ukraine);
- Dzyuba A. P., Doctor of Physico-Mathematical Sciences (Dnepropetrovsk State University, Dnepropetrovsk, Ukraine);
- Shubenko A. L., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Institute of Machine- Building Problems of The National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkov, Ukraine);
- Gadyaka V. G., Candidate of Sciences (Engineering) (Public joint-stock company "Frunze Sumy Machine-Building Scientific and Production Incorporation");
- Yozhef Zayats, Doctor of Engineering Sciences, Professor (Koshitse Technological Institute, Koshitse, Slovakia);
- Karpus V. E., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Academy of Internal Military Forces of the Ministry of Home Affairs of Ukraine, Kharkov, Ukraine).



CONTENTS

| | | |
|---|-------------------|------------------|
| ENGINEERING, MACHINES AND TOOLS | ● ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ | A |
| I. N. Pyzhov, V. G. Klimenko Investigation of the Contact Area of the Wheel Working Surface and the Workpiece at a Flat Face Grinding With Axial Tilting Of Spindle | | A 1–A 6 |
| Y. V. Petrakov, V. V. Pysarenko, O. S. Mackivsky Directions of Development of the CAM-systems | | A 7–A 13 |
| V. A. Pasichnik, O. O. Khmurenko Classification of Constructive and Technological Parameters of Caisson Structures Made of Carbon Fiber Reinforced Plastic | | A 14–A 20 |
| INVESTIGATION OF WORK PROCESSES IN MACHINES AND DEVICES | ○ ● ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ | B |
| S. M. Vaneev, D. V. Miroshnichenko Research Vortex Expansion Machine with External Peripheral Channel Using Virtual Test Rig | | B 1–B 12 |
| TECHNICAL REGULATION AND METROLOGICAL SUPPORT | ○ ○ ○ ● ○ ○ ○ ○ ○ | D |
| S. V. Sohan, J. Havlik, M. Nimchevska-Woyzeck, D. V. Efrosinin, N. A. Miller-Kaglyak Evaluation of Smooth Surface Roughness of Nonmetallics by Micro Interference Method | | D 1–D 9 |
| MODERN ENERGY –EFFICIENT TECHNOLOGIES | ○ ○ ○ ○ ● ○ ○ ○ | E |
| V. Boiko, M. Sotnyk Electrical Modeling of Workflows in Electrical Systems of Water Supply Networks | | E 1–E 12 |
| PROBLEMS OF MATERIALS SCIENCE | ○ ○ ○ ○ ○ ● ○ ○ | F |
| M. N. Boyko Determine the Rational Parameters of Burning Pellets with Solid Fuel on the Conveyor Machine | | F 1–F 5 |
| N. V. Poliakova Electrochemical Characteristics of High Chromium Cast Iron in Different Structural States as a Factor of Quality Estimation of the Hot Rolling Mill Rolls Working Layer | | F 6–F 10 |
| ENVIRONMENTAL ENGINEERING | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ● ○ | G |
| R. A. Vaskin, V. O. Solyanyk, I. V. Vaskina Modelling of the Emission and Concentration Distribution of Vehicles in the Environment | | G 1–G 5 |
| COMPUTER ENGINEERING | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ● | H |
| A. S. Rizhova, V. V. Moskalenko Intelligent Diagnostic System For Static Radionuclide Examination | | H 1–H 8 |

СОДЕРЖАНИЕ

| | | |
|---|---------------------|----------|
| ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ, СТАНКИ И ИНСТРУМЕНТЫ | ● ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ | A |
| И. Н. Пыжов, В. Г. Клименко Исследование площади контакта режущей поверхности круга с деталью при плоском торцовом шлифовании с наклоном оси шпинделя | | A 1–A 6 |
| Ю. В. Петраков, В. В. Писаренко, А. С. Мацковский Направления развития САМ-систем | | A 7–A 13 |
| В. А. Пасечник, А. А. Хмуренко Классификация конструктивных и технологических параметров кессонных конструкций из полимерных композиционных материалов | | A 14–A20 |
| ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ В МАШИНАХ И АППАРАТАХ | ○ ● ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ | B |
| С. М. Ванеев, Д. В. Мирошниченко Исследование вихревой расширительной машины с внешним периферийным каналом с помощью виртуального стенда | | B 1–B 12 |
| ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ | ○ ○ ○ ● ○ ○ ○ ○ ○ ○ | D |
| С. В. Сохань, И. Гавлик, М. Нимчевска-Войцек, Д. В. Ефросинин, Н. А. Мельник-Кагляк Оценка шероховатости гладких поверхностей неметаллов микроинтерференционным методом | | D 1–D 9 |
| СОВРЕМЕННЫЕ ЭНЕРГО- ЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ | ○ ○ ○ ○ ○ ● ○ ○ ○ ○ | E |
| В. С. Бойко, Н. И. Сотник Электрическое моделирование рабочих процессов в электромеханических системах сетей водоснабжения | | E 1–E 12 |
| ВОПРОСЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ● ○ ○ ○ | F |
| М. Н. Бойко Определение рациональных параметров обжига окатышей с твёрдым топливом на конвейерной машине | | F 1–F 5 |
| Н. В. Полякова Электрохимические характеристики высокохромистого чугуна в различных структурных состояниях как фактор оценки его качества | | F 6–F 10 |
| ИНЖЕНЕРНАЯ ЭКОЛОГИЯ | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ● ○ ○ | G |
| Р. А. Васькин, В. О. Соляник, И. В. Васькина Моделирование распределения концентрации выбросов от автотранспорта в пространстве | | G 1–G 5 |
| КОМПЬЮТЕРНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ | ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ● ○ | H |
| А. С. Рыжова, В. В. Москаленко Интеллектуальная система диагностики для радионуклидного статического обследования | | H 1–H 8 |

ЗМІСТ

**ТЕХНОЛОГІЯ МАШИНОБУДУВАННЯ,
ВЕРСТАТИ ТА ІНСТРУМЕНТИ**

A

І. М. Пишов, В. Г. Клименко

Дослідження площі контакту різальної поверхні круга з деталлю при плоскому торцевому шліфуванні з нахилом осі шпинделя

A 1–A 6

Ю. В. Петраков, В. В. Писаренко, О. С. Мацківський

Напрями розвитку САМ-систем

A 7–A 13

В. А. Пасічник, О. О. Хмуренко

Класифікація конструктивних і технологічних параметрів кесонних конструкцій із полімерних композиційних матеріалів

A 14–A 20

**ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ
У МАШИНАХ ТА АПАРАТАХ**

B

С. М. Ванєєв, Д. В. Мірошніченко

Випробування вихрової розширювальної машини із зовнішнім периферійним каналом за допомогою віртуального стенда

B 1–B 12

**ТЕХНІЧНЕ РЕГУЛЮВАННЯ І
МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ**

D

С. В. Сохань, І. Гавлик, М. Нимчевська-Войцек, Д. В. Єфросинін, Н. А. Мельник-Кагляк

Оцінювання шорсткості гладких поверхонь неметалів мікроінтерференційним методом

D 1–D 9

**СУЧАСНІ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ
ТЕХНОЛОГІЇ**

E

В. С. Бойко, Н. І. Сотник

Електричне моделювання робочих процесів в електромеханічних системах мереж водопостачання

E 1–E 12

ПИТАННЯ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА

F

М. М. Бойко

Визначення раціональних параметрів відпалу котунів із твердим паливом на конвеєрній машині

F 1–F 5

Н. В. Полякова

Електрохімічні характеристики високохромистого чавуну в різних структурних станах як фактор оцінювання його якості

F 6–F 10

ІНЖЕНЕРНА ЕКОЛОГІЯ

G

Р. А. Васькін, В. О. Соляник, І. В. Васькіна

Моделювання розподілу концентрації викидів від автотранспорту у просторі

G 1–G 5

КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

H

А. С. Рижова, В. В. Москаленко

Інтелектуальна діагностична система для радіонуклідного статичного обстеження

H 1–H 8

Дослідження площі контакту різальної поверхні круга з деталлю при плоскому торцевому шліфуванні з нахилом осі шпинделя

І. М. Пижов¹⁾, В. Г. Клименко²⁾

¹⁾ Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Фрунзе, 21, м. Харків, Україна, 61002;

²⁾ Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка, Першотравневий проспект, 24, м. Полтава, Україна, 36011

Article info:

Paper received:

11 October 2015

The final version of the paper received:

23 November 2015

Paper accepted online:

10 December 2015

Correspondent Author's Address:

¹⁾ diamet@inbox.ru

²⁾ klim_poltava@mail.ru

Набули подальшого розвитку питання, пов'язані з особливостями контакту робочої поверхні круга з деталлю в умовах плоского торцевого шліфування з попереднім нахилом осі шпинделя. Основна увага приділена площі контакту різальної поверхні круга (РПК) з деталлю, оскільки це значною мірою визначає теплонапруженість у зоні обробки. Показана визначальна роль кута нахилу шпинделя, діаметра круга та глибини шліфування. На основі геометричного комп'ютерного моделювання в середовищі КОМПАС запропонована емпірична залежність, що зв'язує площу контакту РПК з деталлю із зазначеними параметрами і дозволяє на практиці обґрунтовано призначати кут нахилу шпинделя з точки зору забезпечення допустимої площі, а отже, й потрібного рівня температури в зоні обробки.

Ключові слова: верстат, довжина дуги контакту, ширина контакту, обробка на «прохід», багатопрхідне шліфування, глибинна схема обробки, поздовжня подача, довжина контакту круга з деталлю, допустиме значення параметра.

ВСТУП

Відомо, що значна кількість виробів у машинобудуванні та інших галузях промисловості потребує технологічних операцій плоского шліфування. При цьому досить широко використовують верстати, що працюють торцем круга. Серед них особливе місце займають верстати з вертикальним розміщенням шпинделя. Вони можуть мати як обертові, так і прямокутні столи [1 - 3]. Крім того, використовуються двосторонні верстати, на яких можна одночасно обробляти поверхні деталі відразу з обох боків.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ ТА АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Шліфувальні верстати з вертикальним розміщенням шпинделя забезпечують високі показники продуктивності та точності оброблювання при досить низькій шорсткості обробленої поверхні виробів. За умови, що діаметр круга більший, ніж ширина робочого столу, оброблення поверхні проводять, як правило, «на прохід», що сприятливо позначається на значеннях вихідних показників обробки. Такі верстати призначені для шліфування плоских поверхонь в умовах масового та серійного типів виробництва. Відомо, що шліфування торцем круга характеризується відносно великою величиною дуги контакту та поверхні взаємодії круга з деталлю, що обумовлює високі температури в зоні шліфування [1]. Тому

площу контакту можна взяти як параметр для керування теплонапруженістю процесу шліфування. Одним із найбільш ефективних технологічних прийомів регулювання площі контакту РПК із деталлю є попередній нахил осі шпинделя верстата. При чорновому шліфуванні ось шпинделя нахилиють на кут α до чотирьох градусів [1] у горизонтальній площині в напрямку поздовжньої подачі. При чистовій обробці кут зменшують, а на етапі прецизійної обробки він дорівнює нулю [2]. Таким чином, за рахунок нахилу осі шпинделя зменшують площу контакту РПК із деталлю та уникають надмірного нагрівання (а також і деформації) останньої. На практиці це дозволяє досягти значного підвищення продуктивності обробки [1 - 2]. Особливості формування плоских поверхонь при застосуванні схем обробки «на прохід» та в умовах багатопрхідного шліфування детально розглянуто у праці [3]. У той самий час аналіз літературних джерел інформації засвідчив, що дані стосовно визначення площі контакту торцевого круга з деталлю в умовах попереднього нахилу осі шпинделя відсутні. А це не дозволяє технологам повною мірою використовувати переваги схеми обробки з попереднім нахилом осі шпинделя.

Таким чином, питання, пов'язані з установленням впливу параметрів зони контакту торцевих кругів з деталлю на площу, є актуальними.

Метою цієї статті є встановлення залежності, що зв'язує з умовами обробки площу контакту РПК із

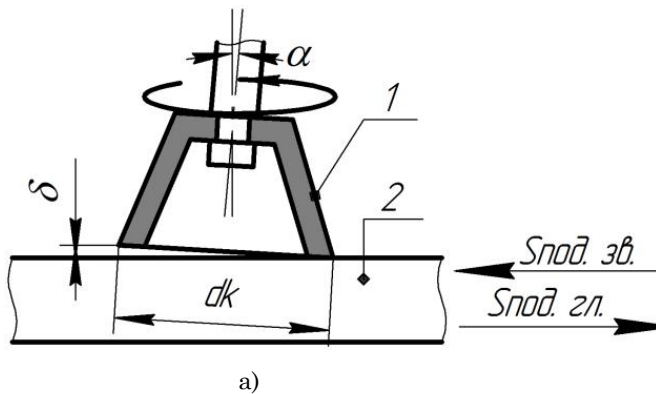
деталлю при плоскому торцевому шліфуванні з попереднім нахилом осі шпинделя.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Залежно від напрямку поздовжньої подачі (Спод. зв. та Спод. гл.) стола верстата відносно напрямку кута нахилу осі шпинделя процес може бути реалізований на практиці як за звичайною (класичною), так і глибинною схемою шліфування (рис. 1 а, б).

На рисунку 2 показані основні параметри зони контакту РПК із деталлю.

Це такі фізичні параметри, як довжина дуги L (рис. 2 а) та довжина контакту РПК W' (рис. 2 б) із



деталлю, що характеризують площу S контакту РПК із деталлю. Довжина W' у міру збільшення значення кута α при незмінній глибині різання t зменшується за законом

$$W' = \frac{t}{\sin \alpha} \quad (1)$$

Ширина зони контакту B' та глибина шліфування t фактично є технологічними показниками зони контакту. Разом зі швидкістю шліфування вони впливають на ефективну потужність процесу обробки.

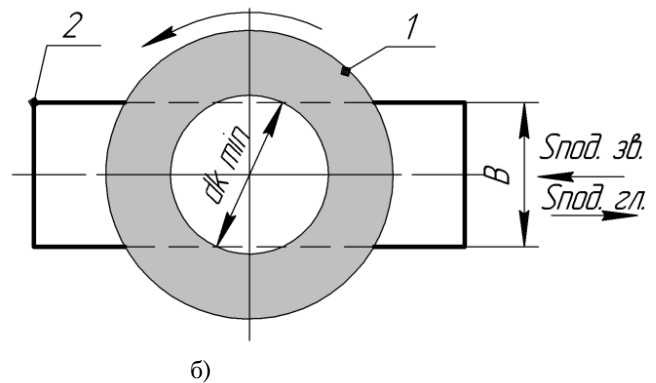


Рисунок 1 - Ілюстрація звичайної (Спод. зв.) та глибинної (Спод. гл.) схем шліфування:
1 - шліфувальний круг; 2 - деталь

Відомо [4], що загальна кількість теплоти, яка виділяється, еквівалентна потужності, що витрачається на процес різання. Оскільки площа впливає на потужність і температуру обробки, то вона може бути взята як фактор, який обмежує значення параметрів зони контакту. Ширину B' необхідно також знати для визначення величини поперечної подачі при багатопохідному шліфуванні.

Під час обробки плоскої поверхні з конкретною шириною B (рис. 2) на площу контакту РПК із деталлю впливають такі технологічні фактори, як кут нахилу α , глибина шліфування t та зовнішній діаметр круга d_k .

На сьогодні при розв'язуванні конкретних задач комп'ютерне моделювання успішно конкурує з аналітичними методами. Тому в даному випадку для встановлення залежності площі S із зазначеними вище факторами були проведені дослідження шляхом геометричного комп'ютерного моделювання у середовищі КОМПАС [5 - 6].

Наше основне завдання – одержати дослідну модель та з її допомогою визначити ті чи інші параметри, що нас цікавлять.

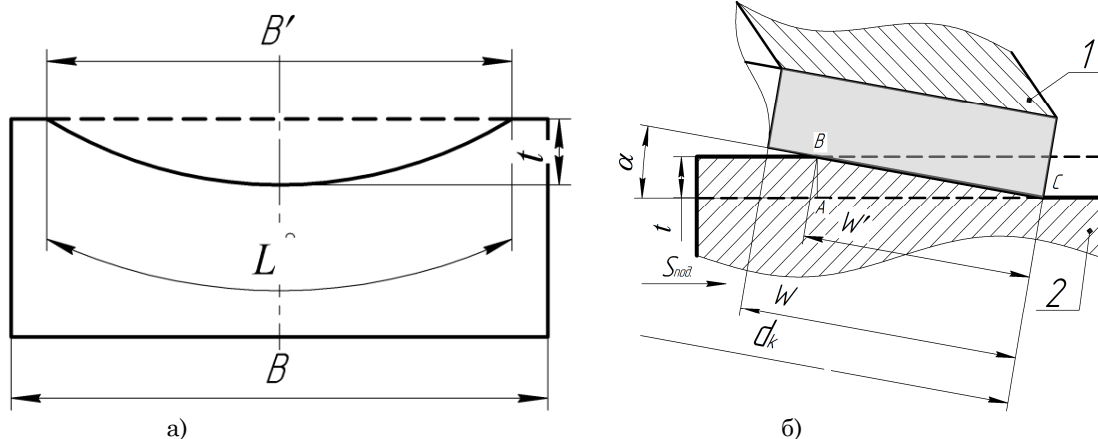


Рисунок 2 - До визначення параметрів зони контакту РПК з деталлю: 1-шліфувальний круг; 2-деталь

Побудова моделі починається з основи – першого формоутворювального елемента. У нашому випадку це частина поверхні деталі, що умовно обробляється. Для одержання таких даних, як площа контакту круга з деталлю, довжина дуги контакту та ін., створюємо ефект обробки поверхні заданої деталі. Для цього у середній площині нашої заздалегідь створеної деталі будемо ескіз (рис. 3 а), що імітує переріз

тієї частини шліфувального круга, яка виконує шліфування в певний момент у даній точці. За допомогою операції «Вирізати обертанням» видаляємо ту частину поверхні деталі, яку обробив круг (рис. 3 б). За допомогою інструментальної панелі «Вимірювання» можна виконати різноманітні вимірювання, зокрема й площі (рис. 4).

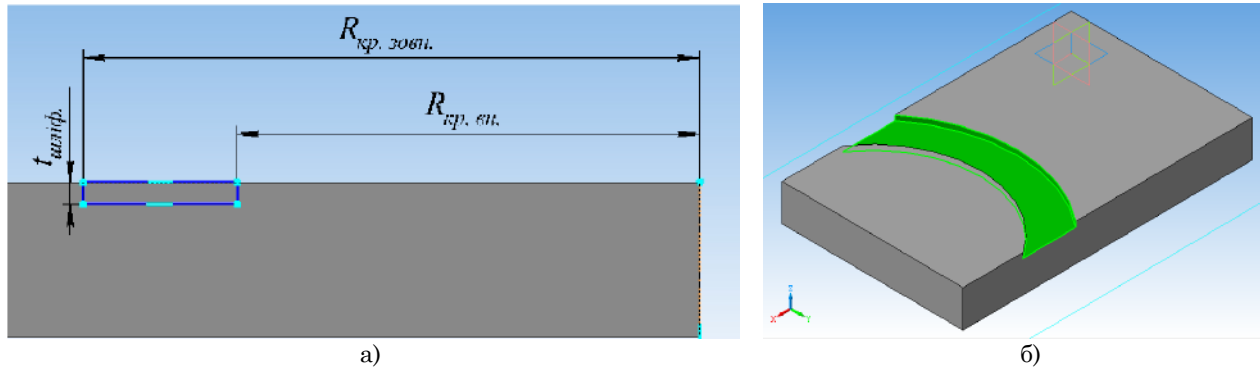


Рисунок 3 - Ескіз шліфувального круга (а) та фрагмент обробленої поверхні (б)

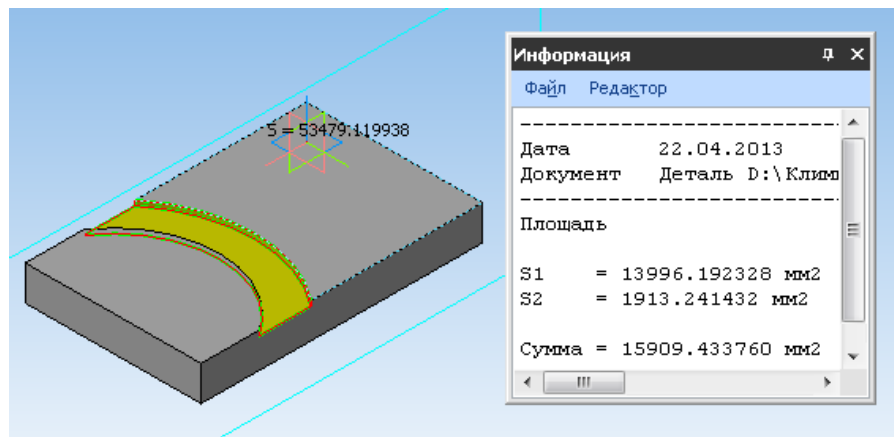


Рисунок 4 - До визначення площі контакту РПК з деталлю

Загальними умовами експерименту було таке: $d_{k \min} = B = 250$ мм, $d_k = d_{k \max} = 400$ мм; $t = 0,05$ мм; $\alpha = 1^\circ$.

Результати моделювання показали, що функції $S = f(\alpha)$, $S = f(d_k)$ та $S = f(t)$ достатньо коректно можна описати степеневими залежностями, які дають наочне уявлення про характер та ступінь впливу факторів на площу.

Математична обробка результатів комп'ютерних експериментів із застосуванням методу найменших квадратів дозволила вивести узагальнену залежність площі контакту S від умов обробки. Ця залежність має такий вигляд:

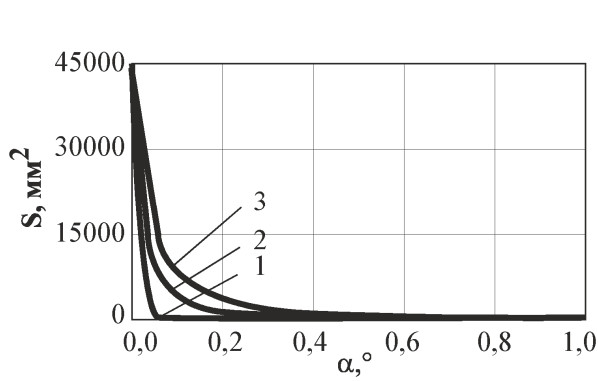
$$S = 587,10 \cdot \alpha^{-1,49} \cdot t^{1,49} \cdot d_k^{0,49} \quad (2)$$

При цьому похибка між експериментальними та розрахунковими даними не перевищує 5 %.

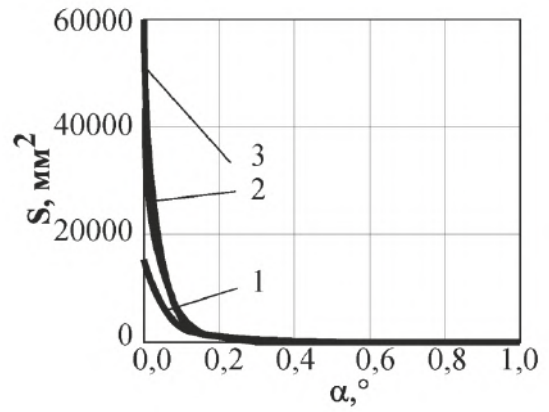
Графіки залежностей, що відображають вплив умов обробки на площу, наведені на рисунках 5 - 6.

Їх аналіз засвідчує, що попередній нахил осі шпинделя на кут α дозволяє у достатньо широких межах керувати значенням площі S . Найбільш різка зміна площі контакту РПК з деталлю має місце у зоні малих значень кутів попереднього нахилу осі шпинделя ($\alpha < 0,25^\circ$). Завдяки значній площі, у зоні шліфування можуть розвиватися високі температури. Але такі значення кутів α характерні для чистового шліфування, яке, як відомо, реалізується з малими глибинами обробки, що сприяє зменшенню теплопруженості процесу шліфування.

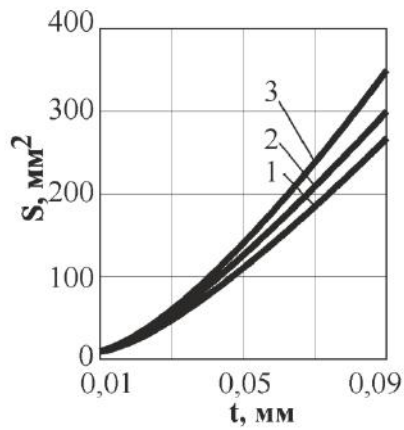
Таким чином, у цілому можна зробити висновок, що чим більше значення кута нахилу α , менший розмір діаметра круга d_k та менша глибина шліфування t , тим менші значення площі S будуть мати місце при плоскому торцевому шліфуванні й навпаки. Що стосується параметрів t та d_k , то їх вплив узгоджується з традиційним процесом шліфування торцем круга.



а) 1 - $t = 0,01$ мм; 2 - $t = 0,05$ мм; 3 - $t = 0,09$ мм

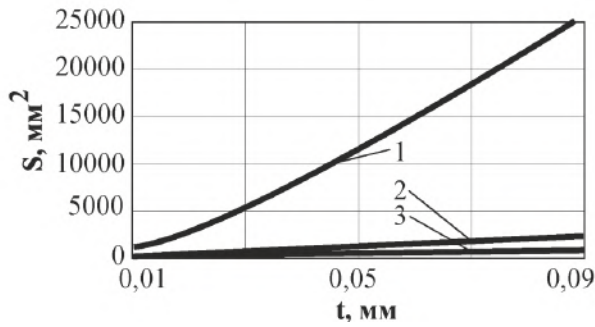


б) 1 - $d_k = 300$ мм; 2 - $d_k = 400$ мм; 3 - $d_k = 500$ мм

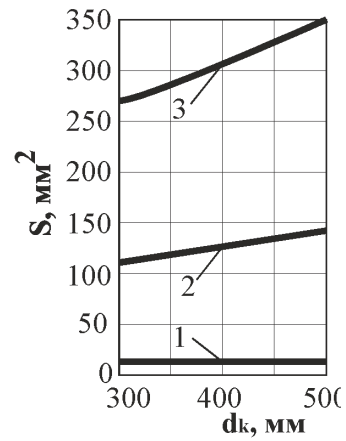


в) 1 - $d_k = 300$ мм; 2 - $d_k = 400$ мм; 3 - $d_k = 500$ мм

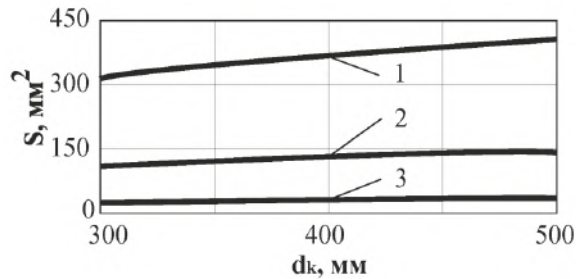
Рисунок 5 - Графіки залежностей $S = f(\alpha, t)$, $S = f(\alpha, d_k)$ та $S = f(t, d_k)$



а) 1 - $\alpha = 0,05^\circ$; 2 - $\alpha = 0,25^\circ$; 3 - $\alpha = 0,5^\circ$



б) 1 - $t = 0,01$ мм; 2 - $t = 0,05$ мм; 3 - $t = 0,09$ мм



в) 1 - $\alpha = 0,50^\circ$; 2 - $\alpha = 1,00^\circ$; 3 - $\alpha = 2,75^\circ$

Рисунок 6 - Графіки залежностей $S = f(t, \alpha)$, $S = f(d_k, t)$ та $S = f(d_k, \alpha)$

На основі формули (1) маємо, що величина кута α при конкретних значеннях d_k , t та допустимій величині площі контакту РПК із деталлю $[S]$ (наприклад, із точки зору допустимого рівня температури шліфування) повинна підлягати такій нерівності:

$$\alpha \geq -1.49 \sqrt{\frac{[S]}{587,10 \cdot t^{1.49} \cdot d_k^{0.49}}} \quad (3)$$

Це дозволяє на практиці для конкретної технологічної операції (чорнова, чистова) при відомих значеннях діаметра круга та глибини достатньо точно визначити мінімально допустиме значення кута α , при якому площа контакту РПК із деталлю, а отже, й температура в зоні обробки будуть знаходитися у допустимих межах. Це дасть можливість уникнути браку шліфованих виробів із цієї причини.

Зв'язок площі контакту РПК із деталлю може бути встановлений шляхом теоретичних розрахунків [4, 7] або експериментальних досліджень.

ВИСНОВКИ

Таким чином, виконані розробки дозволили виявити залежність між площею контакту РПК з деталлю та умовами обробки при плоскому торцевому шліфуванні з попереднім нахилом осі шпинделя. Встановлено, що:

1. Попередній нахил осі шпинделя на кут α дозволяє у достатньо широких межах керувати значенням площі.
2. Найбільш різка зміна площі контакту РПК із деталлю має місце у зоні малих значень кутів попереднього нахилу осі шпинделя ($\alpha < 0,25^\circ$).
3. Чим більше значення кута нахилу α , менший розмір діаметра круга d_k та менша глибина шліфування t , тим менші значення площі S будуть мати місце при плоскому торцевому шліфуванні й навпаки.

Investigation of the contact area of the wheel working surface and the workpiece at a flat face grinding with axial tilting of spindle

Ivan N. Pyzhov¹⁾, Vitally G. Klimenko²⁾

¹⁾ National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", 21, Frunze Str, Kharkiv, Ukraine, 61002;

²⁾ Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, 24, Pershotravnevyi avenue, Poltava, Ukraine, 36011

Issues related to the peculiarities of a contact between the wheel working surface and the workpiece in a flat face grinding with axial tilting of spindle were further developed. Basic attention is given to the contact area of a wheel and a workpiece because it largely determines the thermal stress in the grinding zone. The paper shows the determinative roles of the angle of a spindle axial tilting, the wheel diameter and the grinding depth. Based on the geometric computer modeling in the KOMPAS environment, empirical dependence of the contact area on the specified parameters is offered. That allows determining the reasonable angle of an axial tilting of spindle to ensure the allowable area and, consequently, the temperature level in the grinding zone.

Keywords: machine, arc length of contact, contact width, through-feed grinding, multistep grinding, deep cut-map, length feed, length of a contact between wheel and workpiece, parametric allowable value.

Исследование площади контакта режущей поверхности круга с деталью при плоском торцевом шлифовании с наклоном оси шпинделя

И. Н. Пыжов¹⁾, В. Г. Клименко²⁾

¹⁾ *Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002;*

²⁾ *Полтавский национальный технический университет им. Юрия Кондратюка, Первомайский проспект, 24, г. Полтава, Украина, 36011*

Получили дальнейшее развитие вопросы, связанные с особенностями контакта рабочей поверхности круга с деталью в условиях плоского торцевого шлифования с предыдущим наклоном оси шпинделя. Основное внимание уделено площади контакта режущей поверхности круга (РПК) с деталью поскольку это в значительной степени определяет теплонапряженность в зоне обработки. Показана определяющая роль угла наклона шпинделя, диаметра круга и глубины шлифования. На основе геометрического компьютерного моделирования в среде КОМПАС предложена эмпирическая зависимость, связывающая площадь контакта РПК с деталью с указанными параметрами и позволяющая на практике обоснованно назначать угол наклона шпинделя с точки зрения обеспечения допустимой площади, а следовательно, и нужного уровня температуры в зоне обработки.

Ключевые слова: станок, длина дуги контакта, ширина контакта, обработка на «проход», многопроходное шлифование, глубинная схема обработки, продольная подача, длина контакта круга с деталью, допустимое значение параметра.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лурье Г. Б. Шлифовальные станки и их наладка / Г. Б. Лурье, В. Н. Комиссаржевская. – М. : Высшая школа, 1972. – 416 с.
2. Наерман М. С. Справочник молодого шлифовщика. / М. С. Наерман. - М. : Высш. шк., 1985. - 207 с.
3. Kunderák J. Some Features of the Surface Micro- and Macroprofile Formation at Flat Face Grinding with Spindle Axis Inclination / J. Kunderák, V. Fedorovich, I. Pyzhov, A. Markopoulos, V. Klimenko // Applied Mechanics and Materials; 2015; Vols. 809 – 810; pp. 45 - 50, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.809-810.45, Trans Tech Publications, Switzerland.
4. Сайт журнала «Наука и образование». Научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/606036.html>.

5. Киндрук М. КОМПАС-3D V10 на 100 % / М. Киндрук – Питер: Санкт-Петербург, 2009. - ISBN 978-5-388-00375-1. - 559 с.
6. Грабченко А. И. Компьютерне моделювання зони контакту торцевого круга з деталлю на плоскошліфувальних верстатах / А. І. Грабченко, І. М. Пижов, В. Г. Клименко // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: матеріали XI міжнародної науково-технічної конференції. – Краматорськ; 2013. – С. 62.
7. Сипайлов В. А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности / В. А. Сипайлов. -М. : Машиностроение, 1978. - 167 с.

REFERENCES

1. Lur'e, G. B. & Komissarzhevskaya, V.N. (1972). Shlifoval'nye stanki i ih naladka [Grinding machines and their adjustment]. Moskva, Vysshaya shkola [in Russian].
2. Naerman, M.C. (1985). Spravochnik molodogo shlifovshchika [Handbook for beginners in grinding]. Moskva, Vysshaya shkola [in Russian].
3. Kunderák J., Fedorovich V., Pyzhov I, Markopoulos A, Klimenko V. Some Features of the Surface Micro- and Macroprofile Formation at Flat Face Grinding with Spindle Axis Inclination / Applied Mechanics and Materials, Vols. 809 - 810 (2015), pp. 45 - 50, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.809-810.45, Trans Tech Publications, Switzerland.
4. Sajt zhurnala «Nauka i obrazovanie». Nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Bauman [Website of the journal "Science and Education". Scientific publication MSTU. NE Bauman]. Retrieved from <http://technomag.bmstu.ru/doc/606036.html> [in

- Russian].
5. Kindruk, M. (2009). KOMPAS-3D V10 na 100 % [KOMPAS-3D V10 at 100%]. Sankt-Peterburg, Piter [in Russian].
6. Grabchenko, A.I., Pizhov, I.M., & Klimenko, V.G. (2013). Komp'yuterne modelyuvannya zoni kontaktu tortsevogo kruga z detallyu na ploskoshlifival'nih verstatah [Computer modeling of the contact area of a circle with the mechanical parts on surface grinding machines]. Heavy engineering. Problems and prospects of development. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferentsii - Proceedings of the international scientific conference (p. 62). Kramators'k [in Ukrainian].
7. Sipajlov, V.A. (1978). Teplovye protsessy pri shlifovanii i upravlenie kachestvom poverhnosti [Thermal processes in grinding and management of surface quality]. Moskva, Mashinostroenie [in Russian].

Напрями розвитку САМ-систем

Ю. В. Петраков¹⁾, В. В. Писаренко²⁾, О. С. Мацківський³⁾^{1), 2), 3)} НТУУ «Київський політехнічний інститут», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

Article info:

Paper received:

13 November 2015

The final version of the paper received:

25 November 2015

Paper accepted online:

10 December 2015

Correspondent Author's Address:

¹⁾ yp-86@yandex.ru

У статті поданий аналіз методів управління процесами оброблення на верстатах із ЧПУ на базі апіорної, поточної та апостеріорної інформації. Управління за апіорною інформацією передбачає розв'язання задачі стабілізації процесу різання за критерієм швидкості видалення припуску через комп'ютерне моделювання, що відбувається за запропонованим алгоритмом. Управління за поточною інформацією має на меті стабілізацію деякої характеристики процесу різання, наприклад потужності, і передбачає створення системи адаптивного управління зі зворотним зв'язком, що забезпечується програмним методом через датчики системи ЧПУ верстата. Управління за апостеріорною інформацією доцільно використовувати для підвищення точності оброблення. Алгоритм такого управління передбачає проектування скоригованої траєкторії на другому проході за результатами вимірювань похибки після першого проходу.

Ключові слова: САМ-системи, верстата з ЧПУ, управління процесами різання.

ВСТУП

Сучасна технологічна підготовка виробництва деталей на верстатах із ЧПУ передбачає широке застосування САМ-систем (Computer Aided Manufacturing), що автоматизують проектування керувальних програм, а для деталей складної форми просто неможливо створити керувальну програму оброблення без таких систем. Аналіз можливостей наявних на ринку високих технологій САМ-систем [1, 2] засвідчує, що всі вони розв'язують геометричні задачі проектування траєкторій формоутворення для складних поверхонь деталей, мають широкий спектр постпроцесорів, різноманітні опції технологічної підтримки тощо.

Однак процес оброблення виконується на верстатах, які мають певну жорсткість, характеризується квазістаціонарністю процесу різання і для досягнення найкращих результатів вимагає урахування цих реальних умов. Таким чином, процес оброблення деталей різанням можна розглядати як об'єкт, що зазнає дії збурень і потребує перманентного управління. Якщо на початку, на першому етапі розвитку САМ-систем їх можливості дозволяли обробити, зазвичай, на верстатах із ЧПУ, поверхні деталей, які вважалися за нетехнологічні й такі, що навіть не реалізуються, то зараз цього вже мало: технологи-програмісти почали звертати увагу на продуктивність, точність та якість обробки. Проте, як відзначають експерти [1], відсутність яких-небудь інноваційних перетворень з керування процесом різання останнім часом змусила фірми шукати нові рішення [3].

Отже, проблеми переходу на якісно новий рівень проектування керувальних програм для верстатів із ЧПУ є актуальною науково-технічною проблемою.

ПОСТАВЛЕННЯ ПРОБЛЕМИ

Метою цього дослідження є розроблення напрямів удосконалення алгоритмів САМ-систем, що дозволять урахувати реальні процеси оброблення деталей різанням на верстатах із ЧПУ і вирішувати основне завдання задачі будь-якого машинобудівного виробництва – виготовлення деталей заданої точності та якості за мінімальний час.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

Із теорії автоматичного управління [4] відомі два принципи управління – за помилкою і за збуренням і три основні методи управління – за апіорною, поточною й апостеріорною інформацією. Саме на базі цих канонів і можливо вирішення основного завдання оброблення деталей різанням.

У процесі проведення досліджень [5] був сформульований загальний алгоритм управління процесом різання, який полягає в послідовному вирішенні трьох завдань: 1) стабілізації умов різання під час руху за формоутворювальною траєкторією; 2) оптимізації всього процесу різання за критерієм максимуму продуктивності; 3) корекція формоутворювальної траєкторії на останньому проході. Оскільки управління процесом різання на верстаті з ЧПУ може здійснюватися переважно через керувальну програму, вирішення цих завдань

повинне проводитися автоматично під час підготовки керувальної програми в САМ-системі.

На кафедрі технології машинобудування НТУУ «КПІ» були розроблені та систематизовані основні методи управління за часом надходження інформації, що використовується для його формування: за апіорною інформацією, управління за поточною інформацією та управління за апостеріорною інформацією. Кожен із цих методів може мати на меті вирішення одного з наведених вище завдань або всіх трьох одночасно.

Управління за апіорною інформацією

Таке управління формується безпосередньо в САМ-системі під час проектування керувальної програми на підставі початкових даних про поверхню деталі, яку потрібно обробити, заготовку, інструмент і деяких інших, відомих на цьому етапі відомостей та має на меті стабілізацію умов різання за критерієм швидкості видалення припуску (MRR – Material Removal Rate) [6], що розраховується з розв'язання задачі оптимізації процесу.

Сутність управління за апіорною інформацією пояснюється схемою рис. 1 і полягає в тому, що на основі вивчення процесу формоутворення, який здійснюється в замкненій технологічній обробній системі (ТОС), визначають модифікацію передатних функцій W_{np} процесу різання та W_{enc} еквівалентної пружної системи, які апіорі передбачаються, і розраховують визначену швидкість зрізування Q_{z1} як функцію подачі так, щоб під час різання забезпечувався збіг фактичної Q_{ϕ} швидкості із заданою Q_{z1} під час різання. Із структурної схеми (рис. 1) маємо:

$$Q_{\phi} = Q_{z1} \frac{1}{1 + W_{np} W_{enc}}. \quad (1)$$

Управління досягається введенням у канал регулювання коригувального елемента з передатною функцією W_k :

$$Q_{z1} = Q_z W_k. \quad (2)$$

Після підстановки (1) у (2), одержимо

$$Q_{\phi} = Q_z \frac{W_k}{1 + W_{np} W_{enc}}. \quad (3)$$

За методом унаслідок корекції необхідно забезпечити $Q_{\phi} = Q_z$. З виразу (3) очевидно, що для виконання рівностей необхідно прийняти

$$W_k = 1 + W_{np} W_{enc}. \quad (4)$$

Саме така передатна функція відповідає з'єднанню елементів, показаних на рис. 1.

Коригувальний елемент повинен бути реалізований під час підготовки керувальної програми заданим переміщенням інструменту. Таким чином, цей метод управління імперативно передбачає використання верстата з ЧПУ. Система управління є розімкненою, і тому її ефективність повністю залежить від точності апіорної інформації.

Оскільки основним критерієм ефективності процесу різання є швидкість видалення припуску, тому на етапі проектування керувальної програми необхідно визначати таку характеристику за її аналогом, тобто за об'ємом видаленого припуску, зв'язаним із траєкторією інструмента, а потім стабілізувати процес за критерієм MRR управлінням подачею інструмента за формотвірною траєкторією. Визначити об'єм припуску, що зрізається, на етапі проектування керувальної програми можна під час моделювання процесу оброблення заготовки. Більшість САМ-систем мають у своєму складі модуль візуалізації спроектованого процесу оброблення, проте з нього неможливо одержати необхідну інформацію про процес різання. Таким чином, необхідно створити новий модуль САМ-системи, що розв'язує таку задачу на базі апіорної інформації про геометрію заготовки, деталі та інструменту і траєкторій формотвірних рухів, які розраховуються будь-якою САМ-системою.

Такий модуль був створений на кафедрі технології машинобудування НТУУ «КПІ» та апробований під час моделювання різних видів оброблення. відповідно до алгоритму (рис. 2), що ілюструє моделювання контурної 2D-обробки циліндричним інструментом 1 заготовки 2 довільної форми під час руху за траєкторією 3, геометричний образ заготовки, поданий у кресленні, перетворюється на цифровий масив (умовно показаний кружками на рис. 2).

Так само подається траєкторія формотвірного руху.

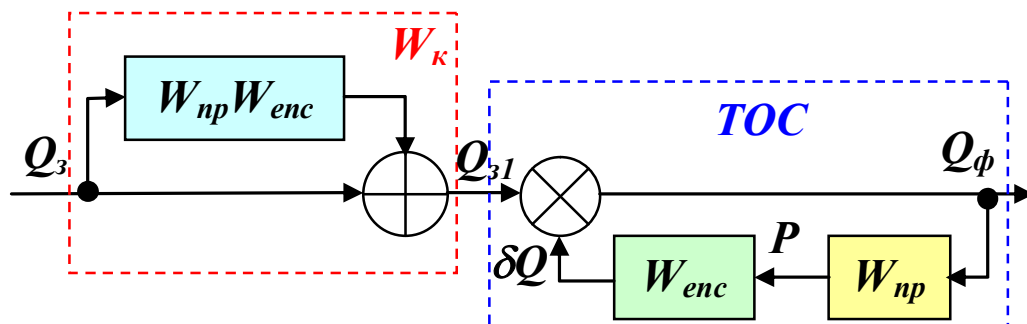


Рисунок 1 - Схема управління за апіорною інформацією

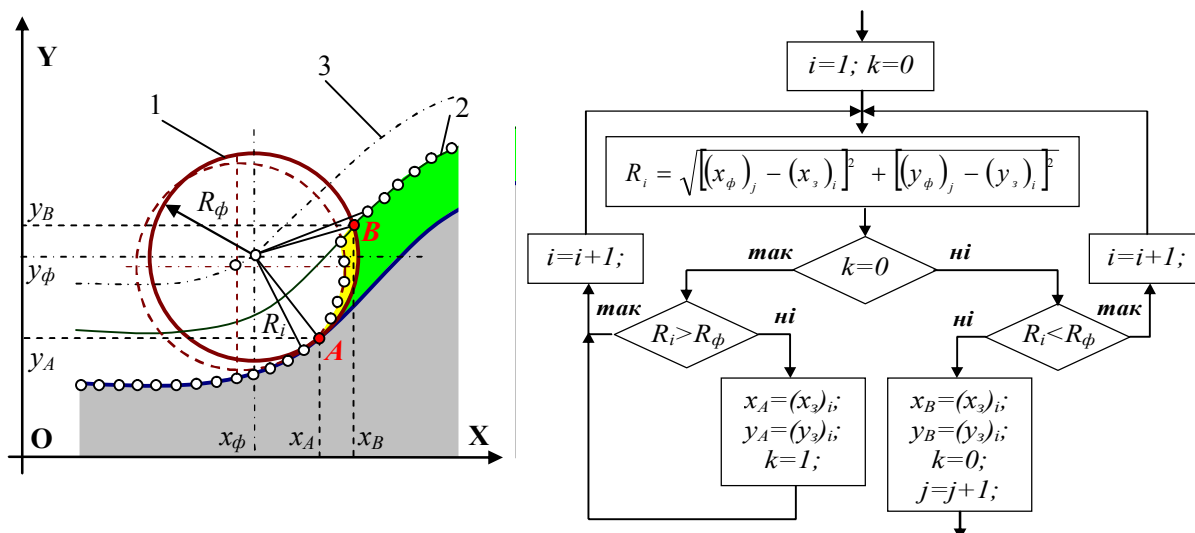


Рисунок 2 - Схема та алгоритм визначення дуги різання

Під час моделювання за кожний крок функціонує алгоритм, що визначає координати точки контуру заготовки, де починається дуга різання (точка А) і де вона закінчується (точка В). Після цього функціонує спеціальна процедура, яка перераховує контур заготовки з урахуванням ділянки АВ, що утворилася внаслідок видалення матеріалу заготовки на цьому кроці моделювання, і готує дії алгоритму на наступному кроці, що повторює процедури, але вже із зміненним контуром заготовки.

Як свідчить практика, такий модуль здатний визначати об'єм припуску, що зрізається, при обробленні різних поверхонь, зокрема з урахуванням реальної форми фрез із зубцями, навіть при 3D-обробці [7]. Розроблена математична модель ураховує кут нахилу леза зуба фрези й товщину заготовки, а визначений на кожному кроці моделювання об'єм матеріалу, що зрізається, враховує сумарну площу різання при знаходженні в зоні різання одного, двох і більше зубів фрези.

За одержаним масивом зміни об'єм припуску, що зрізається, для стабілізації процесу різання на всій траєкторії формотвірного руху розраховується масив зміни подачі. Такий підхід був апробований на практиці та довів свою ефективність [8].

Порівняння розробленого методу управління із стратегією Vortex, розробленою фірмою Delsam для стабілізації процесу фрезерування [3], демонструє деякі переваги, які полягають у тому, що метод забезпечує стабілізацію процесу фрезерування, за основною його характеристикою – силою (потужністю) різання, може бути реалізований на будь-яких верстатах із ЧПУ без тестування їх динамічних характеристик. Крім того, враховуючи можливість моделювання процесу зрізування припуску кожним зубом, створюються передумови до оптимізації процесу різання, а саме вибору такого рівня середньої подачі та частоти обертання фрези, які в умовах дії обмежень, зокрема за шорсткістю обробленої поверхні, дозволяють забезпечити максимальну продуктивність.

Метод управління за апріорною інформацією був неодноразово успішно реалізований на кафедрі технології машинобудування НТУУ «КПІ», наприклад, при шліфуванні робочої поверхні ендопротезу колінного суглоба людини на верстаті з ЧПУ [8].

Управління за поточною інформацією

Ідея стабілізації процесу різання за допомогою замкнених систем автоматичного управління (САУ) була реалізована вченими школи Б. С. Балакшина ще у 80-ті роки минулого сторіччя. Проте нерозвиненість елементної бази, обчислювальної техніки та верстатів з ЧПУ не дозволила довести експериментальні зразки до промислового використання. Значні переваги таких САУ у стабілізації процесу різання привертати увагу вчених та виробників, і сьогодні нарешті з'явилися надійні промислові зразки. Фірма Omative System США [9] пропонує систему, побудовану на використанні поточної інформації, реалізовану на сучасному рівні для верстатів із ЧПУ, що вже випускаються провідними фірмами та обладнані різними датчиками. Саме ці датчики й використовуються фірмою як датчики зворотного зв'язку для своїх САУ. Оскільки застосовується поточне управління безпосередньо через систему ЧПУ і контролери приводів, фірма розробила різні версії, адаптовані до систем верстатів провідних виробників: Siemens, Fanuc, Heidenhain. Як визначають необхідне співвідношення, за яким виконують регулювання, – know how фірми.

На кафедрі технології машинобудування НТУУ «КПІ» були розпочаті роботи зі створення САМ-системи автоматичного управління процесом різання, що використовує відомий принцип управління за помилкою [10]. САУ створюється за функціональною схемою, поданою на рис.3.

Відповідно до розробленої функціональної схеми САУ вона складається з наступних основних модулів: модуль оптимізації, модуль управління і модуль зворотного зв'язку.

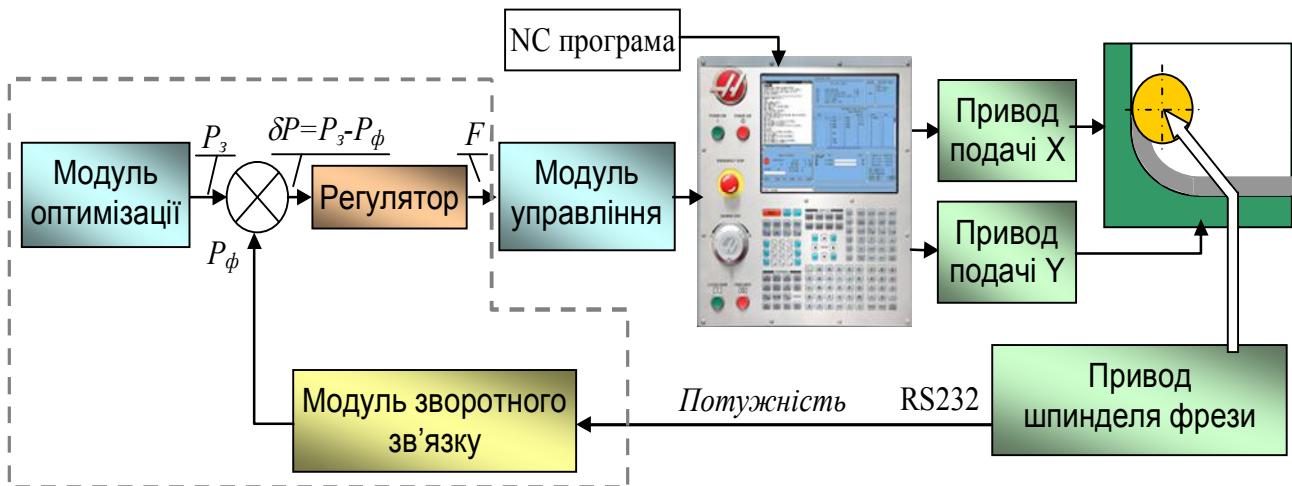


Рисунок 3 - Функціональна схема САУ

Для реалізації САУ необхідно вирішити три основні завдання: створення модуля оптимізації, модуля управління та модуля зворотного зв'язку. Відповідно до мети на етапі моделювання САУ достатньо дослідити функціонування САУ без модуля оптимізації, програмне забезпечення якого залежатиме від результатів, одержаних при моделюванні замкненого контура. Частина функціональних блоків САУ, обведених пунктирною лінією на рис. 3, реалізована програмним методом у ПК, а модуль управління впливає на систему через стандартний рознім аналогічно ручному управлінню маховиком зменшення або збільшення поточної подачі.

За результатами експериментальних досліджень найкращі результати з якості управління, що оцінювалася за швидкістю й точністю, в регуляторі здійснюються управлінням за пропорційно-диференціально-інтегральним законом:

$$F = \delta P(k + T_d s + 1/T_i s), \quad (5)$$

де k – коефіцієнт передачі; T_d – постійна часу диференціювання; T_i – постійна часу інтегрування; s – оператор Лапласа. Оптимальні величини параметрів визначаються експериментально [10].

Управління за апостеріорною інформацією

Такий метод управління використовується переважно для підвищення точності обробки шляхом корекції формотвірною траєкторії [11]. Оскільки при обробці на верстаті з ЧПУ у баланс похибки виготовлення деталі ліву частку займає похибка, спричинена пружними деформаціями технологічної

оброблювальної системи (ТОС), виникає можливість розрахунку деформації на основі апріорної інформації. Проте здебільшого одержання достовірних відомостей про жорсткість ТОС при виконанні конкретної операції досить проблематичне. Тому для корекції формотвірної траєкторії пропонується використовувати результати вимірювання уже обробленої деталі для управління процесом обробки наступної (рис. 4), а при обробці складних, дорогих виробів в одиничному виробництві використовувати результати вимірювань після так званого пробного проходу. Необхідно відзначити, що поширений на практиці спосіб корекції ЧПУ «на радіус» у даному випадку абсолютно непридатний.

Оскільки основною метою методу є забезпечення точності, то як параметр управління взята глибина різання. На структурній схемі за рис. 4: H_z – задана; H_{z1} – скорегована; H_ϕ – фактична глибина різання; δH – випадкова складова. Далі прийняті ті ж самі позначення, що й на схемі за рис. 1, а запізнення відображається передатною функцією $be^{-\tau s}$, де b – коефіцієнт корекції; τ – час циклу обробки й вимірювання однієї деталі; s – оператор Лапласа.

Такий метод управління може здійснюватися як в режимі «ручного» управління, так і в автоматичному режимі. Останнє передбачає створення комплексу, що автоматично вимірює оброблену деталь і через спеціально розроблену процедуру передає інформацію на верстат із ЧПУ для відповідної корекції позицій інструмента на величину очікуваної похибки наступної деталі.

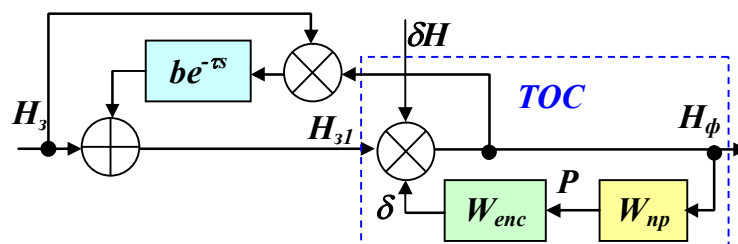


Рисунок 4 - Схема управління за апостеріорною інформацією

Пропонується наступна методика розрахунку корекції формотвірної траєкторії для компенсації похибок, спричинених пружними деформаціями ТОС за методикою пробних проходів. Згідно з робочою гіпотезою, покладеною в основу методу, в похибці обробки міститься вся необхідна для корекції інформація. Була створена математична модель, що визначає характеристики жорсткості ТОС при токарній обробці за двома координатами Z та X на підставі даних вимірювань після першого проходу і розраховує корекцію траєкторії інструмента на другому, останньому, проході. Математична модель використовує залежності жорсткості ТОС від поздовжньої координати Z при закріпленні заготовки в патроні та задньому центрі [12].

Для апробації розробленого способу була створена прикладна програма, інтерфейс якої поданий на рис. 3. У програму завантажуються файли, що містять необхідні для моделювання дані про умови оброблення на першому проході, а також дані вимірювань діаметра заготовки після оброблення на першому проході. Оскільки вимірювання були зроблені з кроком 10 мм по координаті Z, у програмі

передбачена процедура розрахунку цифрового масиву контура заготовки за сплайном, що дозволяє забезпечити необхідну точність.

Після завантаження вихідного файлу починається моделювання, в процесі якого створюється цифровий масив скоригованої траєкторії на другому проході. На осцилографі з'являються такі графіки: лінія 1 – глибина різання на першому проході (постійна за довжиною величина); лінія 2 – похибка, що утворилася та визначена за результатами вимірювань і представлення сплайном; лінія 3 – розрахована за корекцією зміна глибини різання на другому проході; лінія 4 – прогнозована похибка при спроектованій корекції.

Автоматично створений файл управління, що містить дані за скоригованою траєкторією, може бути збережений у форматі *.txt і використаний під час проектування керувальної програми для токарного верстата з ЧПУ. Розроблений спосіб був апробований під час оброблення реальної заготовки на верстаті SL20 фірми HAAS і підтвердив свою ефективність: похибка була зменшена у 8 разів порівнянно з обробленням без корекції.

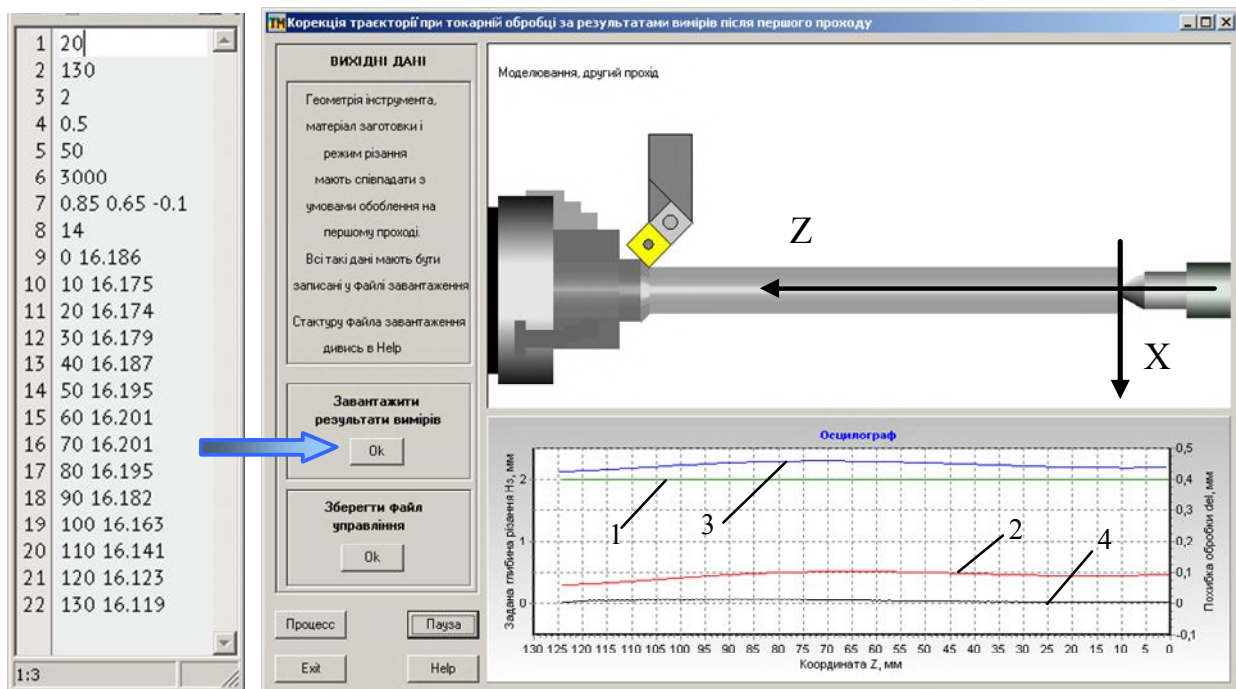


Рисунок 5 - Інтерфейс програми корекції за апостеріорною інформацією

ВИСНОВКИ

1. Розроблений спосіб управління за апіорною інформацією з метою стабілізації режиму різання за критерієм швидкості зрізування припуску базується на попередньому моделюванні процесу оброблення, в результаті якого автоматично створюється файл управління подачею за формотвірною траєкторією. Спосіб був апробований під час токарної обробки, фрезерування і шліфування. Доведено, що ефективність способу залежить від адекватності

математичних моделей процесу різання, які в багатьох випадках потребують уточнення.

2. Управління за поточною інформацією є перспективним, але вимагає наявності на верстаті з ЧПУ датчиків зворотного зв'язку і супроводжується апаратною модернізацією системи його управління. Крім того, алгоритми управління ще потребують удосконалення, як у плані швидкодії, сталості системи в цілому, так і в плані вибору мети управління і математичної моделі оптимізації.

3. Управління за апостеріорною інформацією наразі поки що не застосовується в САМ-системах,

проте для вирішення завдання підвищення точності обробки, особливо складних поверхонь, таке управління є дуже перспективним, урахувавши фактичну невизначеність априорної інформації про характеристики жорсткості ТОС під час обробки. Оскільки метод передбачає оброблення, як мінімум, у два проходи з контрольними вимірюваннями, його використання доцільне при виготовленні

відповідальних деталей, де втрати часу на операцію компенсуються вирашем у точності оброблення. Для автоматизації процесу вимірювань може бути використаний програмний продукт PowerInspect фірми Delcam.

Directions of Development of the CAM-systems

Yu. V. Petrakov¹⁾, V. V. Pysarenko²⁾, O. S. Mackivsky³⁾

^{1), 2), 3)} National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Victory Avenue, 37, Kyiv, Ukraine, 0305.

The article presents the analysis of methods of control of machining processes on CNC machines based on a priori, on-line and a posteriori information. The control of a priori information involves the task of stabilizing of cutting process on the criterion of material removal rate through computer simulation, which is performed in accordance with the developed algorithm. On-line control aims at the stabilization of certain characteristics of cutting process, such as cutting power, and provides for the establishment of adaptive feedback control system, which is carried out programmatically through the sensors of the CNC. Control on a posteriori information could be used to improve the accuracy of treatment. The algorithm of such control in a single production involves the design of trajectory which is corrected during a second pass based on the measurement results of error after the first pass.

Keywords: CAM-system, CNC machines, control of cutting process.

Направления развития САМ-систем

Ю. В. Петраков¹⁾, В. В. Писаренко²⁾, А. С. Мацковский³⁾

^{1), 2), 3)} НТУУ «Киевский политехнический институт», пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056

В статье представлен анализ методов управления процессами обработки на станках с ЧПУ на основе априорной, поточной и апостериорной информации. Управление по априорной информации предусматривает решение задачи стабилизации процесса резания по критерию скорости срезания припуска через компьютерное моделирование, выполняющееся в соответствии с разработанным алгоритмом. Управление по текущей (on-line) информации имеет целью стабилизацию некоторой характеристики процесса резания, например мощности, и предусматривает создание системы адаптивного управления с обратной связью, обеспечивающейся программным методом через датчики станка с ЧПУ. Управление по апостериорной информации целесообразно использовать для повышения точности обработки. Алгоритм такого управления в единичном производстве предусматривает проектирование скорректированной траектории на втором проходе по результатам измерений погрешности после первого прохода.

Ключевые слова: САМ- системы, станки с ЧПУ, управление процессами резания.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Суханов Ю. Проект «короли» и «капуста» на рынке САМ / ж. CAD/CAM/CAE Observer, № 3 (71), 2012. - С. 10 - 25.
2. Петраков Ю. В. Развитие САМ-систем автоматизованого програмування верстатів із ЧПУ : Монографія. – К. : Січкар, 2011. – 220 с.
3. Евченко К., Пинчук А. PowerMill 2013: стратегия Vortex и новые возможности для программирования пятиосевой обработки / САПР и графика. – 2012. - № 11. – С. 88 - 91.
4. Петраков Ю. В. Автоматичне управління процесами обробки матеріалів різанням. – УкрНДІАТ, Київ, 2004. – 336 с.
5. Петраков Ю.В. Методи управління точністю оброблення різанням : сб. Вестник Национального технического университета Украины «КПИ». – 2006. - № 48. - С. 102 - 110.
6. Jerard R., Fussell B., Ercan M. On-line Optimization of Cutting Conditions for NC Machining // Manufacturing & Industrial Innovation Research Conference, Tampa, Florida, 2011.
7. Петраков Ю. В. 3-D моделирование для САМ-систем // Вісник СевНТУ : зб. наук. пр. / Севастоп. нац. техн. ун-т. - Севастополь : Вид-во Севастоп. нац. техн. ун-ту, 2011. - Вып. 118: Машиноприладобудування та транспорт. - С. 119 - 125.
8. Петраков Ю. В., Писаренко В. В. Підготовка програми шліфувального верстату з ЧПУ для виготовлення штучного суглоба людини // сб. ДонНТУ Прогресивні технології і системи машинобудування : Міжнародний збірник наукових праць. – 2010. - Вып. 40. - С. 200 - 205.

9. Системы адаптивного регулирования и мониторинга для металлообрабатывающих станков с CNC / <http://www.omative.com/173890/ACM>.
10. Петраков Ю. В., Кореньков В. М., Мацківський О. С. Идентифікація процесу різання на верстаті з ЧПУ / 36. Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Краматорськ. - 2013. - № 32. - С.312 - 316.
11. Петраков Ю. В., Мацківський О. С. Забезпечення якості

- регулювання системи адаптивного управління фрезеруванням на верстаті з ЧПК / Вісник Житомирського державного технологічного університету, серія Технічні науки. – 2015. - № 2 (73). - С. 81 - 85.
12. Петраков Ю. В., Ковальчук Д. П. Повышение точности токарной обработки на станках с ЧПУ Вісник НТУУ «КПІ» Машинобудування. – Київ. - 2013. - № 68. - С. 134 - 138.

REFERENCES

1. Suhanov Y. (2013) Proekt "koroly" i "kapusta" na rynke CAM [The project "kings and cabbage" in the market]. CAD/CAM/CAE Observer, № 3 (71), 10 - 25 [in Russian].
2. Petrakov Y. V. (2011) Rozvitok CAM-system avtomatyzovanogo programuvannya verstativ z CHPU [The development of CAM-system for CNC machine]. Kiev: Sychkar [in Ukrainian].
3. Evchenko K., Pynchuk A. (2012) PowerMill 2013: strategiya Vortex i novye vozmozhnosti dlya programmirovaniya piatyosevoy obrabotky [PowerMill 2013: the Vortex strategy and new opportunities for programming of five-axis machining]. SAPR and graphics, № 11, 88 - 91 [in Russian].
4. Petrakov Y. V. (2004) Avtomatychnye upravlinnia procesami obrobki materialiv rizanniam [Automatic control of machining processes]. UkrNDIAT, Kiev [in Ukrainian].
5. Petrakov Y. V. (2004) Metody upravlinnia tochnistu obroblennia rizanniam [The methods of accuracy control for machining]. Bulletin of National technic university of Ukraine "KIP", № 48, 102 - 110 [in Russian].
6. Jerard. R., Fussell B., Ercan M. (2011) On-line Optimization of Cutting Conditions for NC Machining // Manufacturing & Industrial Innovation Research Conference, Tampa, Florida.
7. Petrakov Y. V. (2011) 3D-modelirovanie dlya CAM-system [3D-simulation for CAM-system]. Bulletin of Sevastopol national technical University, Mechanical engineering and transport, Mechanical engineering and transport, vol. 118, 119 - 125 [in Russian].
8. Petrakov Y. V., Pysarenko V. V. (2010) Pidgotovka programy shlifovalnogo verstatu z CHPK dlya виготовлення штучного сеглоба людини [The preparation of the control program of the grinding CNC-machine for machining of artificial joint in the human body]. Bulletin of DonNTU, Progressive technologies and systems engineering, vol. 40, 200 - 205 [in Ukrainian].
9. Sestemy adaptivnogo regulirovaniya i monitoring lkh metalloobrabatyvaucshih stankov s CNC [Adaptive control and monitoring for CNC-machine tools] Retrieved from <http://www.omative.com/173890/ACM>.
10. Petrakov Y. V., Korenkov V. M., Mackivsky O. S. (2013) Identifikacia procesu rizannia na verstaty z CHPU [Identification of cutting process on the CNC machine]. Reliability of the tool and optimization of technological systems, № 32, Kramatorsk, 312 - 316 [in Ukrainian].
11. Petrakov Y. V., Mackivsky O. S. (2015) Zabezpechennia yakosti reguluvannya systemy adaptivnogo upravlinnia frezeruvanniam na verstaty z CHPU [Ensuring quality control systems adaptive control of milling on the CNC machine]. Bulletin of Zhitomir state technological University, Series Technical science, № 2 (73), 81 - 85 [in Ukrainian].
12. Petrakov Y. V., Kovalcvhuk D. P. (2013) Povyszenie tochnosti tokarnoy obrabotki na stankah s CHPU [The accuracy increase in precision turning on CNC machines]. Bulletin of National technic university of Ukraine "KIP", № 68, 134 - 138 [in Russian].

Класифікація конструктивних і технологічних параметрів кесонних конструкцій із полімерних композиційних матеріалів

В. А. Пасічник¹⁾, О. О. Хмуренко²⁾

¹⁾ *Механіко-машинобудівний інститут НТУУ «КПІ», проспект Перемоги, 37, Київ, Україна, 03056*

Article info:

Paper received:

17 November 2015

The final version of the paper received:

09 December 2015

Paper accepted online:

10 December 2015

Correspondent Author's Address:

¹⁾ pasichnyk@ukr.net

Розглянуто вплив специфічних конструктивних і технологічних параметрів складових частин конструкцій із полімерних композиційних матеріалів на окремі процедури їх моделювання. Подано результати аналізу сучасних авіаційних конструкцій із різними частками неметалевих матеріалів у складових елементах, а також технологій їх складання. Запропоновано актуальний класифікатор кесонних конструкцій, що відображає основні параметри складових частин із композиційних матеріалів та дає можливість сформулювати специфічні конструктивні й технологічні вимоги до конструкції. Специфічні вимоги дозволять забезпечити коректну імітацію неструктурованості та анізотропії властивостей композиційних матеріалів окремих складових частин при конструктивно-технологічному моделюванні складаної конструкції в цілому. Запропоновані рішення дозволять полегшити процедури оцінювання та забезпечення параметрів якості складаних конструкцій із композиційних матеріалів.

Ключові слова: специфічні вимоги при моделюванні, складана композиційна конструкція, класифікатор.

ВСТУП

Із розвитком конструкційних матеріалів для авіабудування, а саме широким використанням полімерних композиційних матеріалів (далі – ПКМ), виникає ряд науково-технічних проблем на різних етапах життєвого циклу порівняно з класичною металевією конструкцією. Наприклад, на етапах проектування та підготовки виробництва виникає проблема моделювання безпосередньо складових частин (далі – СЧ) різних конструкцій із ПКМ і технологій їх виготовлення. Пов'язано це з тим, що ПКМ відрізняються складною неоднорідною структурою та мають анізотропні властивості. Цей фактор викликає необхідність опису та врахування специфічних конструктивних і технологічних параметрів (далі – КТП) при вирішенні завдань моделювання таких конструкцій, а також оцінювання параметрів їх якості. Такі специфічні КТП будуть унікальні для індивідуальних конструкцій, а можливості аналізу моделей, побудованих з їх врахуванням, будуть значно обмежені.

Тому актуальною є мета розроблення універсальної методики формування специфічних вимог при моделюванні конструкцій із ПКМ, яка дозволить врахувати КТП окремих складових частин та коректно оцінити й забезпечити параметри якості складаної конструкції в цілому. Для досягнення такої мети необхідно провести аналіз конструктивних і технологічних параметрів та особливостей сучасних авіаційних конструкцій із ПКМ (пропонуєть-

ся на прикладі кесонних конструкцій (далі – КК), та виконати їх систематизацію, класифікацію й типізацію. У такому вигляді специфічні КТП КК із ПКМ будуть доступні для врахування при вирішенні загальних задач конструктивного і технологічного моделювань.

Конструктивні особливості сучасних авіаційних КК із ПКМ

Одна з перших апробованих концепцій застосування ПКМ у конструкції крила магістрального літака [1], а саме у верхній та нижній панелях, передбачає, що панелі складаються із чотирьох секцій обшивок, підкріплюються стрингерами. Силкові елементи, такі як лонжерони з кронштейнами навіски механізації та нервюри виконані з металевих матеріалів (далі – ММ), що забезпечує задані параметри міцності та жорсткості. Завдання щодо виконання з'єднань панелей із силковими елементами вирішене застосуванням окремих конструктивних елементів – компенсаторів (рис. 1). Така концепція дає можливість зменшити масу несилкових СЧ.

Робота [2] описує можливість застосування ПКМ у силкових елементах. Стрілоподібне крило складається з металевих нервюр (37 од.) та панелей, а стінка лонжеронів та нижні пояси виконані із ПКМ. До конструкції такого крила також входять компенсатори.

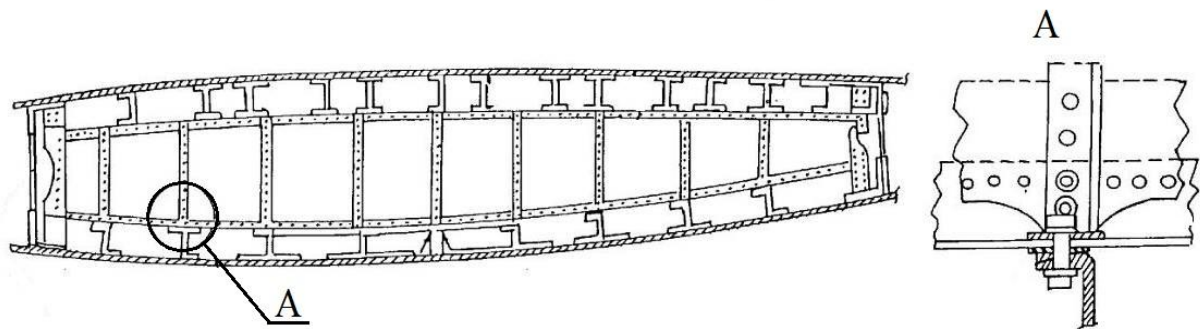


Рисунок 1 – Застосування компенсаторів у КК

Така конструкція дає можливість зменшити масу силових елементів, не знижуючи їх міцності та конструкції в цілому.

У КК таких літаків, як А350 [3] та Bombardier CSeries [4], ПКМ більше застосовується, ніж у вищезазначених, а саме: панелі та лонжерони виконані повністю із ПКМ, а нервюри – із ММ. Такі варіанти компонування значно знижують трудомісткість процесів виготовлення окремих СЧ та їх складань за рахунок мінімізації кількості з'єднань.

У працях [5 - 10] наведені варіанти КК, що містять основні конструктивні частини із ПКМ. КК, описана у працях [6], передбачає наявність компенсаторів, та при цьому з'єднання стінок нервюр та лонжеронів виконуються з використанням металевих фітингів, що також відіграють роль компенсуювальних елементів при складанні (рис. 2). Використання металевих деталей передбачає наявність заклепкових або болтових з'єднань, що підвищує трудомісткість складальних робіт для таких конструкцій.

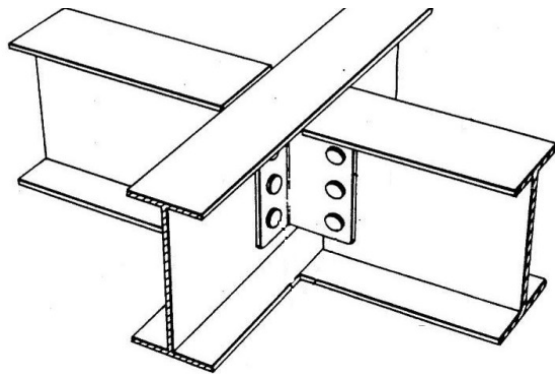


Рисунок 2 – Перестикувальні фітинги при з'єднанні елементів КК

У праці [7] конструкція крила являє собою монолітну частину планера літака. Поздовжні силові елементи такого крила мають трикутний переріз та сформовані з обшивками. Праця [8] описує концепцію «рівномісного крила», що характеризується малою кількістю нервюр (4 од.), лонжеронів та несучих панелей. Особливістю крила [9] є те, що нижня панель сформована з переднім лонжероном, а верхня - із заднім. Вищезазначені конструкції забезпечують зниження трудомісткості

складальних робіт при збереженні доцільності схеми членування агрегата.

Технологічність сучасних авіаційних КК із ПКМ

У працях [2, 4, 5, 6, 7, 9, 10] наведені варіанти зменшення кількості СЧ, що подаються на складання, і на цій основі - підвищення технологічності конструкції. Для КК, що містять СЧ із ПКМ, основним методом є створення інтегральної конструкції, яка пованна характеризуватись якомога більшою кількістю суцільно відформованих СЧ. Окремі конструктивні й технологічні рішення (далі – КТР), що реалізують таку концепцію можна навести наступним чином:

- верхні та нижні панелі являють собою обшивки, відформовані разом із стрингерами та поясами лонжеронів і нервюр [1, 5];
- панелі являють собою обшивки, відформовані разом із стрингерами [3, 4];
- верхні та нижні панелі являють собою обшивки, відформовані разом із стрингерами та лонжеронами [6];
- монолітна КК складається із лонжеронів та намотаної обшивки [7];
- нижні панелі являють собою обшивки, відформовані разом із переднім лонжероном, стрингерами та поясами нервюр [9];
- верхні панелі являють собою обшивки, відформовані разом із заднім лонжероном, стрингерами та поясами нервюр [9, 10].

У результаті реалізації вищезазначених КТР вартість складання КК була знижена на рівні 20 % порівняно з аналогічною металевою конструкцією.

У результаті реалізації вищезазначених КТР вартість складання КК була знижена на рівні 20%, в порівнянні з аналогічною металевою конструкцією.

У працях [11 - 15] описаний підхід щодо забезпечення технологічності КК із ПКМ, який передбачає застосування модульного принципу складання, тобто паралельне складання окремих СЧ у спеціальних складальних пристосуваннях (далі – СП) – модулях, з послідовною передачею на наступні етапи до складання агрегата та планера в цілому, не знімаючи СЧ із модуля. Такий підхід значно знижує трудомісткість складальних робіт, за рахунок автоматизації СП та забезпечує стабільну точність за рахунок незмінності баз на різних етапах складання, але недоліками є висока вартість модулів та необхідність використовувати їх комплектно для

забезпечення необхідного такту складання.

Для розуміння місця різних технічних рішень подамо їх у системі координат «Ступінь використання ПКМ – складові елементи КК» (рис. 3).

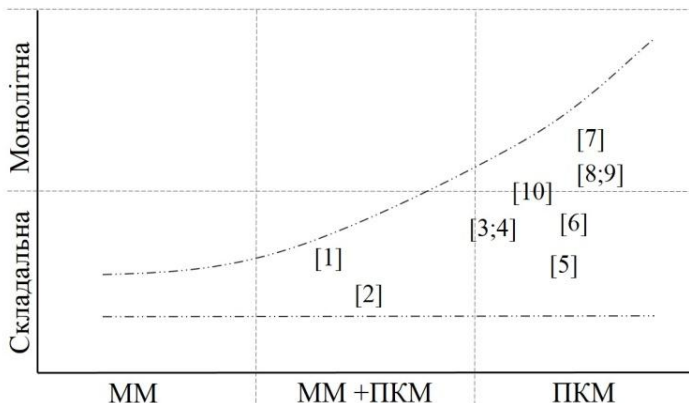


Рисунок 3 – Зв'язок конструктивних особливостей КК з матеріалами конструкції

Наведений на рис. 3 аналіз є частковим, проте він свідчить, що збільшення частки ПКМ у конструкціях літака викликає передумови створення монолітних конструкцій, залишаючи в той самий час можливість застосовувати складальні конструкції, що в сукупності призводить до збільшення кількості варіантів конструктивних рішень та висуває нові вимоги до технологій їх реалізації.

Класифікатор КК із ПКМ

Класифікація КК із ПКМ повинна проводитися згідно з правилами поділу заданої множини специфічних КТП на підмножини (класифікаційні групи) відповідно до встановлених ознак їх відмінності чи подібності. Було висунуто такі вимоги для обраної системи класифікації:

- достатня ємність і необхідна повнота, що гарантують охоплення всіх специфічних КТП КК;

- виправдана глибина оцінювання КТП;
- можливість розширення номенклатури КТП і внесення необхідних змін до структури класифікації;

- забезпечення можливості сполучення з іншими класифікаціями однорідних КТП;
 - забезпечення простоти ведення класифікатора КК.

Проаналізувавши переваги та недоліки основних методів класифікації [16], було зроблено вибір на користь фасетного методу. Для визначення складів фасетів класифікатора КК необхідно визначити класифікаційні ознаки специфічних КТП, що потребує ряд припущень. Типова КК складається з панелей (верхньої – **ВП** та нижньої – **НП**), лонжеронів (переднього – **ПЛ**, заднього – **ЗЛ** та рядових – **РЛ**) та нервюр (кореневої – **КорН**, кінцевої – **КінН**, силових – **СН** і типових – **ТН**) (рис. 4).

Застосування варіантів технологій з'єднань та компенсації відхилень для різних КК і матеріалів їх СЧ подане на рис. 5.

Для вищезазначених технологічних параметрів КК із ПКМ запропонована така система кодування: *конструкція* – *К* (ММ – 1; ММ + ПКМ – 2; ПКМ – 3), *технологічність* – *Т* (складальна *К* – 1; монолітна *К* – 2), *технологія виробництва* – *В*: *виготовлення* *К1_Т2* (механічна обробка – 1; обробка тиском – 2); *виготовлення* *К2_Т2/К3_Т2* (формування – 1; формування – 2); *складання* *К1_Т1/К2_Т1/К3_Т1* (за БП – 1; за БО – 2; за СО – 3), *з'єднання* – 3 (клеєві – 1; заклепкові – 2; болтові – 3; болтозаклепкові – 4; спеціальні – 5), *компенсація* – *КМП* (рідкий заповнювач – 1; металевий компенсатор – 2). Так, наприклад, КК із ПКМ, що складається за БП клейовими з'єднаннями з використанням рідкого заповнювача, буде записуватись таким чином: «*К3_Т1_В1_31_КМП1*». Значення 0 позначатиме невизначеність за заданим параметром.

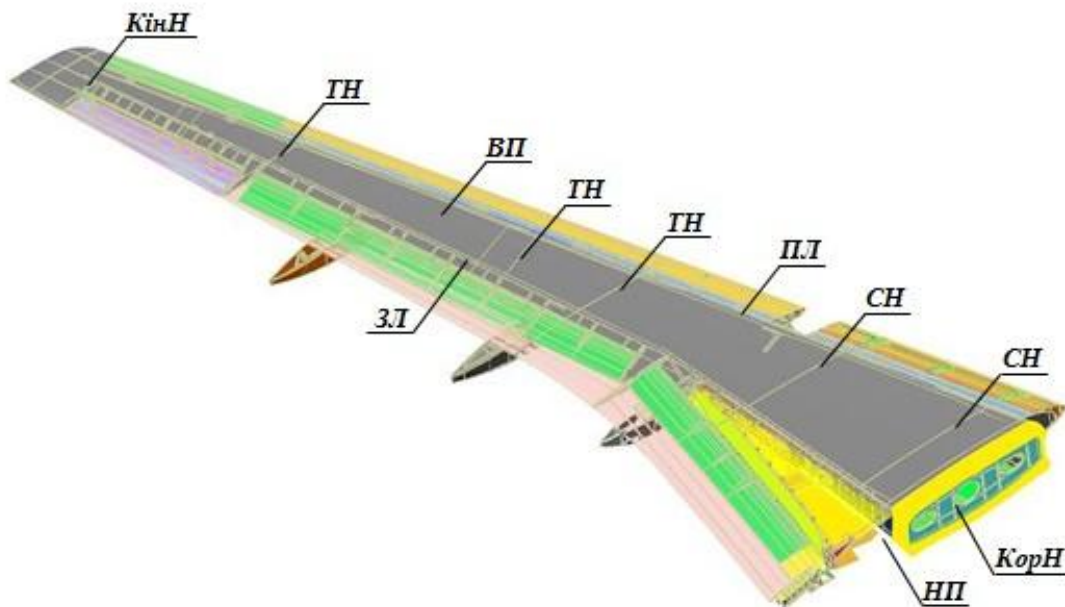


Рисунок 4 – Від'ємна частина крила з прикладом типової КК

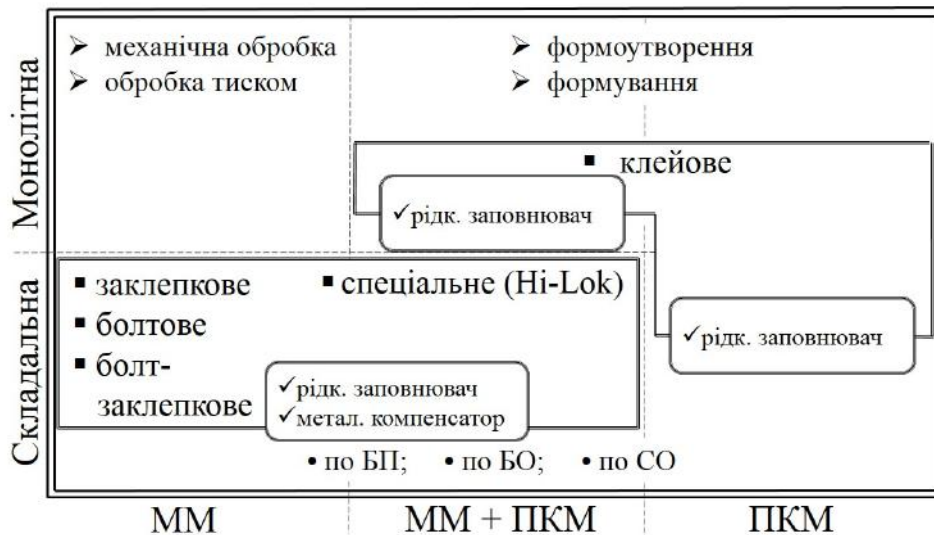


Рисунок 5 – Фасети технологічних параметрів КК із ПКМ:
 □ – технологія виробництва; □ – технологія виконання з'єднань;
 ○ – вид компенсації

Деталізація технологічних операцій виконання з'єднань, що можуть застосовуватися для різних матеріалів СЧ КК, наведена в табл. 1, де 1 – операція застосовується; 0 – операція не застосовується.

Під час вирішення вищезазначених завдань також необхідно проаналізувати з'єднання розглянутих СЧ КК із ПКМ між собою. Для цього необхідно побудувати відповідну матрицю істинності з'єднань

(рис. 6), яка дасть можливість скоротити поставлену задачу, шляхом виключення тих, які не можуть мати місце в реальних КК. У побудованій матриці істинності також використовується прийнята система кодування, де 1 – сполучення присутнє; 0 – сполучення відсутнє.

Таблиця 1 - Фасети технологічних параметрів з'єднань у КК із ПКМ

| Технологічні операції | Матеріали | | | Примітки |
|--|-----------|----------|-----|---|
| | ММ | ММ + ПКМ | ПКМ | |
| <i>Технологія виконання отворів під кріпильний елемент</i> | | | | |
| Свердління | 1 | 1 | 1 | |
| Розсвердлення | 1 | 1 | 1 | |
| Зенкерування | 1 | 1 | 0 | |
| Розгорнення | 1 | 1 | 1 | |
| Протягування | 1 | 1 | 1 | |
| Зенкування | 1 | 1 | 1 | |
| Зміцнення | 1 | 0 | 0 | |
| <i>Технологія установа кріпильного елемента в отвір</i> | | | | |
| Установка із зазором | 1 | 1 | 1 | |
| Забивання | 1 | 0 | 0 | для ПКМ можливо лише з використанням втулок |
| Запресування | 1 | 0 | 0 | |
| Затягування | 1 | 0 | 0 | |
| <i>Технологія виконання замикального елемента</i> | | | | |
| Ударне * | 1 | 0 | 0 | * – для заклепкових з'єднань |
| Імпульсне* | 1 | 0 | 0 | |
| Пресове* | 1 | 1 | 1 | |
| Розкочування* | 1 | 1 | 1 | |
| Згинчування | 1 | 1 | 1 | для ПКМ – значні обмеження крутного моменту |
| Установка шайб | 1 | 1 | 1 | |
| <i>Додаткові операції</i> | | | | |
| Механічна обробка | 1 | 0 | 0 | |

| <i>СЧ</i> | <i>ВП</i> | <i>НП</i> | <i>ПЛ</i> | <i>ЗЛ</i> | <i>РЛ</i> | <i>КорЛ</i> | <i>КінЛ</i> | <i>СН</i> | <i>ТН</i> |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|-------------|-----------|-----------|
| <i>ВП</i> | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>НП</i> | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>ПЛ</i> | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>ЗЛ</i> | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>РЛ</i> | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>Корн</i> | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| <i>КінЛ</i> | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| <i>СН</i> | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| <i>ТН</i> | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Рисунок 6 – Матриця істинності з'єднань СЧ КК із ПКМ

ВИСНОВКИ

Аналіз сучасних конструкцій крил літальних апаратів, що містять СЧ із ПКМ із точки зору їх конструктивних параметрів та особливостей, а також забезпечення їх технологічності, засвідчив, що зазначені КТП є специфічними та кардинально відрізняються від аналогічних параметрів металевих конструкцій.

Результатом систематизації, класифікації та типізації таких специфічних КТП став класифікатор КК, що має розвинену структуру та відображає всі істотні КТП. У цілому запропонований класифікатор являє собою базис універсальної методики формування специфічних вимог при розв'язанні загальних задач моделювання розглянутих конструкцій із ПКМ.

Classification of constructive and technological parameters of caisson structures made of carbon fiber reinforced plastic

V. A. Pasichnik¹⁾, O. O. Khmurenko²⁾

^{1), 2)} National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Institute of Mechanical Engineering, 37, Victory Avenue, Kyiv, Ukraine, 03056

The paper considers influence of specific structural and technological parameters of structures components made of carbon fiber reinforced plastic on separate proceedings modeling. The results from the analysis of modern aircraft structures with different proportions of non-metallic materials in constituent elements, as well as technologies for their assembly are presented. The actual caisson structures qualifier, which reflects the basic parameters of the component parts made of carbon fiber reinforced plastic and allows creating specific design and technological requirements for the modeling was developed. Specific requirements will ensure the correct simulation of not structured and anisotropy of composite materials of some parts in design and technological simulation of assembly as a whole. Proposed solutions will facilitate evaluation procedures and ensure quality parameters of prefabricated structures made of composite materials.

Keywords: specific requirements for modeling; composite structures; qualifier.

Классификация конструктивных и технологических параметров кессонных конструкций из полимерных композиционных материалов

В.А. Пасечник¹⁾, А. А. Хмуренко²⁾

^{1), 2)} *Механико-машиностроительный институт НТУУ «КПИ», проспект Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056*

Рассмотрено влияние специфических конструктивных и технологических параметров составных частей конструкций из полимерных композиционных материалов на отдельные процедуры их моделирования. Представлены результаты анализа современных авиационных конструкций с различными долями неметаллических материалов в составляющих элементах, а также технологий их сборки. Предложено актуальный классификатор кессонных конструкций, отражающий основные параметры составных частей из композиционных материалов и позволяющий сформировать специфические конструктивные и технологические требования к конструкции. Специфические требования позволят обеспечить корректную имитацию неструктурированности и анизотропии свойств композиционных материалов отдельных составных частей при конструктивно-технологическом моделировании сборной конструкции в целом. Предложенные решения позволят облегчить процедуры оценки и обеспечения параметров качества сборных конструкций из композиционных материалов.

Ключевые слова: специфические требования при моделировании, сборная композиционная конструкция, классификатор.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Пат. 12/416024 США, B21D53/88; B64F5/00; B64C1/00. Determinant Wing Assembly / Clayton Munk; Paul Nelson; David Strand / The Boeing Company. – № 8695219; Заявлено 31.03.2009; Опубликовано 15.04.2014. – 7 с.
2. Пат. 11/027570 США, B64C3/20. Aircraft wing composed of composite and metal panels / Victor Munsen, Daniel McGinty, Jan Kordel, Richard Tanner, Scott Ramton, Ian Burford / The Boeing Company. – № 7387277; Заявлено 29.12.2004; Опубликовано 17.07.2008. – 5 с.
3. Пат. 12/574849 США, B64F5/00; B64C1/00; B64C3/20. Composite wings near to major assembly / Siobhan Wagner. – № 7583098; Заявлено 19.10.2009; Опубликовано 27.12.2010. – 6 с.
4. Пат. 10/457398 США, B64C1/00; B64C3/20. C-Series Program Update / Bombardier. – № 3659089; Заявлено 09.07.2009; Опубликовано 17.01.2011. – 3 с.
5. Пат. 12/987630 США, B21D53/88; B64F5/00. AST Composite Wing Program / Michael Karal / The Boeing Company Bombardier. – № 8740985; Заявлено 12.08.2001; Опубликовано 16.12.2002. – 9 с.
6. Пат. 11/239856 США, B21D53/88; B64C3/20. Carbon Fibre Composite Wing Manufacture / Paul Charnock, Robert Brown, Colin Whaties. – № 7893450; Заявлено 18.09.1993; Опубликовано 09.01.1995. – 9 с.
7. Пат. 13/673928 США, B64C3/20; B21D53/88; B64F5/00. Composite Wing and Manufacturing Process Thereof / Sam Williams / Williams International Corporation. – № 6739820; Заявлено 28.11.1994; Опубликовано 29.12.1995. – 11 с.
8. Пат. 12/258947 США, B21D53/88; B64F5/00. Monolithic Composite Wing Manufacturing Process / Kari Appa. – № 6837620; Заявлено 18.10.2001; Опубликовано 19.12.2002. – 7 с.
9. Пат. 11/589607 США, B64C1/00; B64C3/20; B21D53/88; B64F5/00. Method of Manufacturing a Composite Material Wing / Shigeki Tanaka, Atsushi Harada / Fuji Jukogyo Kabushiki Kaisha. – № 8794562; Заявлено 28.12.2004; Опубликовано 10.01.2005. – 5 с.
10. Пат. 12/874930 США, B64C1/00; B64C3/20; B21D53/88; B64F5/00. Wing of Composite and Method of Fabricating the Same / Amaoka Kazuaki, Nagao Takayuki, Harada Atsushi, Takizawa Naoya, Hideyuki Sano, Tol Yasuhiro, Hiraki Megum / Fuji Jukogyo Kabushiki Kaisha. – № 5748973; Заявлено 15.04.2007; Опубликовано 13.11.2008. – 7 с.
11. Stuart Birch (2010). The Art of Wing Assembly. European Editor, Vol 3, 4, 21-27.
12. Brian J. Hogan (2005). Automation Speeds A380 Wing Assembly. Manufacturing Engineering Magazine, Vol 15, 17, 33-39.
13. Brian Rooks (2001). Automatic Wing Box Assembly Developments. Industrial Robot: An International Journal, Vol 5, 9, 57-64.
14. Пат. 12/784957 США, B64C1/00; B64F5/00. Reconfigurable Flexible Tooling for Aerospace Wing Assembly / Henrik Kihlman / DELFOi. – № 8749305; Заявлено 14.02.2009; Опубликовано 23.11.2010. – 07 с.
15. Hastie, T., Tibshirani R., Friedman J. (2009). The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. Springer-Verlag, 2nd ed – 746.

REFERENCES

1. Patent. 12/416024 USA, B21D53/88; B64F5/00; B64C1/00. Determinant Wing Assembly / Clayton Munk; Paul Nelson; David Strand / The Boeing Company. – № 8695219; Stated 31.03.2009; Published 15.04.2014. – 7 p.
2. Patent. 11/027570 USA, B64C3/20. Aircraft wing composed of composite and metal panels / Victor Munsen, Daniel McGinty, Jan Kordel, Richard Tanner, Scott Ramton, Ian Burford / The Boeing Company. – № 7387277; Stated 29.12.2004; Published 17.07.2008. – 5 p.
3. Patent. 12/574849 USA, B64F5/00; B64C1/00; B64C3/20. Composite wings near to major assembly / Siobhan Wagner. – № 7583098; Stated 19.10.2009; Published 27.12.2010. – 6 p.
4. Patent. 10/457398 USA, B64C1/00; B64C3/20. C-Series Program Update / Bombardier. – № 3659089; Stated 09.07.2009; Published 17.01.2011. – 3 p.
5. Patent. 12/987630 USA, B21D53/88; B64F5/00. AST Composite Wing Program / Michael Karal / The Boeing Company Bombardier. – № 8740985; Stated 12.08.2001; Published 16.12.2002. – 9 p.

A

6. Patent. 11/239856 USA, B21D53/88; B64C3/20. Carbon Fibre Composite Wing Manufacture / Paul Charnock, Robert Brown, Colin Whaites. – № 7893450; Stated 18.09.1993; Published 09.01.1995. – 9 p.
7. Patent. 13/673928 USA, B64C3/20; B21D53/88; B64F5/00. Composite Wing and Manufacturing Process Thereof / Sam Williams / Williams International Corporation. – № 6739820; Stated 28.11.1994; Published 29.12.1995. – 11 p.
8. Patent. 12/258947 USA, B21D53/88; B64F5/00. Monolithic Composite Wing Manufacturing Process / Kari Appa. – № 6837620; Stated 18.10.2001; Published 19.12.2002. – 7 p.
9. Patent. 11/589607 USA, B64C1/00; B64C3/20; B21D53/88; B64F5/00. Method of Manufacturing a Composite Material Wing / Shigeki Tanaka, Atsushi Harada / Fuji Jukogyo Kabushiki Kaisha. – № 8794562; Stated 28.12.2004; Published 10.01.2005. – 5 p.
10. Patent. 12/874930 USA, B64C1/00; B64C3/20; B21D53/88; B64F5/00. Wing of Composite and Method of Fabricating the Same / Amaoka Kazuaki, Nagao Takayuki, Harada Atsushi, Takizawa Naoya, Hideyuki Sano, Tol Yasuhiro, Hiraki Megum / Fuji Jukogyo Kabushiki Kaisha. – № 5748973; Stated 15.04.2007; Published 13.11.2008. – 7 p.
11. Stuart Birch (2010). The Art of Wing Assembly. European Editor, Vol 3, 4, 21-27.
12. Brian J. Hogan (2005). Automation Speeds A380 Wing Assembly. Manufacturing Engineering Magazine, Vol 15, 17, 33-39.
13. Brian Rooks (2001). Automatic Wing Box Assembly Developments. Industrial Robot: An International Journal, Vol 5, 9, 57-64.
14. Patent. 12/784957 USA, B64C1/00; B64F5/00. Reconfigurable Flexible Tooling for Aerospace Wing Assembly / Henrik Kihlman / DELFOi. – № 8749305; Stated 14.02.2009; Published 23.11.2010. – 07 p.
15. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. (2009). The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. Springer-Verlag, 2nd ed – 746.

Исследование вихревой расширительной машины с внешним периферийным каналом с помощью виртуального стенда

С. М. Ванеев¹⁾, Д. В. Мирошниченко²⁾

^{1), 2)} Сумский государственный университет, ул. Римского-Корсакова, 2, Сумы, Украина, 40007

Article info:

Paper received:

1 December 2015

The final version of the paper received:

10 December 2015

Paper accepted online:

10 December 2015

Correspondent Author's Address:

¹⁾ vaneevsm@mail.ru

В настоящее время перспективным направлением в энергетике является развитие малых локальных энергоустановок. Увеличивается реализация проектов по энергоснабжению за счет внедрения маломощных утилизационных установок на базе турбодетандерной техники.

Основными препятствиями на пути широкого внедрения маломощных (до 0,5 МВт) установок являются низкий для такой мощности КПД, высокие стоимость и относительные затраты на обслуживание по сравнению с мощными установками. Для мощностей до 500 кВт часто возможно создание установок на базе вихревой расширительной турбомашин в безредукторном исполнении. Преимущества вихревой расширительной машины позволяют получить установку максимально простой и надежной.

Целью данной работы является повышения эффективности и надежности вихревой расширительной машины путем проведения численного исследования течения газа в проточной части и анализа его результатов.

Для реализации целей работы были созданы виртуальный стенд и методика проведения исследований с помощью программного комплекса ANSYS. Проведена верификация полученных вычислительным экспериментом данных для подтверждения корректной работы виртуального стенда и используемой методики.

В результате исследований установлено влияние геометрических и газодинамических параметров на картину течения в проточной части вихревой расширительной машины с периферийным каналом.

По результатам анализа проведенных исследований была спроектирована усовершенствованная проточная часть с расчетным КПД 48 % и получены ее безразмерные и размерные характеристики.

Ключевые слова: турбодетандерная установка, вихревая расширительная машина, испытательный стенд, вычислительный эксперимент, характеристики.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ В ОБЩЕМ ВИДЕ И ЕЕ СВЯЗЬ С ВАЖНЫМИ НАУЧНЫМИ ИЛИ ПРАКТИЧЕСКИМИ ЗАДАЧАМИ

В настоящее время перспективным направлением в энергетике является развитие малых локальных энергоустановок [1]. Специалисты-энергетики, общественные и специализированные группы признали увеличивающуюся роль маломощных, чистых и более эффективных энергогенерирующих систем в обеспечении потребностей мирового сообщества в энергии. Малые модульные системы начали превосходить по эффективности и экологическим характеристикам стационарные электростанции. Также увеличивается реализация проектов по энергоснабжению за счет внедрения маломощных утилизационных установок на базе турбодетандерной техники.

Основными препятствиями на пути широкого внедрения маломощных (до 0,5 МВт) установок являются их низкий КПД и высокие стоимость и относительные затраты на обслуживание по сравнению с мощными установками. Поэтому основные усилия

при исследовании и создании энергоустановок малой мощности направлены на повышение КПД, уменьшение их стоимости, увеличение надежности и снижение затрат на обслуживание.

Для мощностей до 500 кВт часто возможно создание турбоприводов или турбогенераторов на базе вихревой расширительной турбомашин в безредукторном исполнении.

Вихревая расширительная машина имеет все преимущества классических турбин (центростремительных и осевых): единственная подвижная часть - рабочее колесо, совершающее простое вращательное движение, поэтому ее надежность определяется, практически, надежностью и долговечностью только подшипниковых узлов; стабильные выходные характеристики; «сухая» (безмасляная) рабочая полость; простота и безопасность в обслуживании.

Основными преимуществами вихревой расширительной машины в сравнении с осевой или центростремительной являются: простота конструкции, технологичность и низкая себестоимость изготовления; сравнительная низкооборотность, то есть при

прочих равных условиях оптимальная частота вращения вихревой расширительной машины меньше оптимальной частоты вращения классической турбины, поэтому при использовании вихревой расширительной машины возможно безредукторное исполнение агрегата, что резко удешевляет машину и сокращает расходы на обслуживание.

Известны турбодетандерные установки на базе струйно-реактивной турбины [2, 3]. Но эти турбины высокооборотны, и поэтому в конструкции установок на их основе необходимо применение редуктора.

Таким образом, в настоящее время остается потребность в расширительных машинах относительно небольшой мощности (до 500 - 700 кВт), конструктивно простых и надежных в эксплуатации со сроком окупаемости 1 - 2 года.

АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Вихревые турбомашины отличаются большим разнообразием конструктивных схем проточной части. На рисунке 1 показаны некоторые типы меридиональных сечений проточных частей вихревых машин.

При испытаниях вихревой гидравлической турбины с боковым каналом (рис. 1а) достигнут КПД 54 % [4]. Для вихревой гидравлической турбины с внешним периферийным каналом (рис. 1в) получен КПД 13 %, что значительно меньше, чем у турбины с боковым каналом [4]. О. В. Байбаков объясняет низкий КПД турбины с внешним периферийным каналом отсутствием продольного вихря, так как центробежные силы в этом случае препятствуют его возникновению. Удачная попытка устранения нежелательного действия центробежных сил на меридиональное течение в периферийном канале представлена в работе [5]. Автором предложена вихревая ступень с внутренним периферийным каналом (рис. 1г). Достигнуто значение КПД до 30 %.

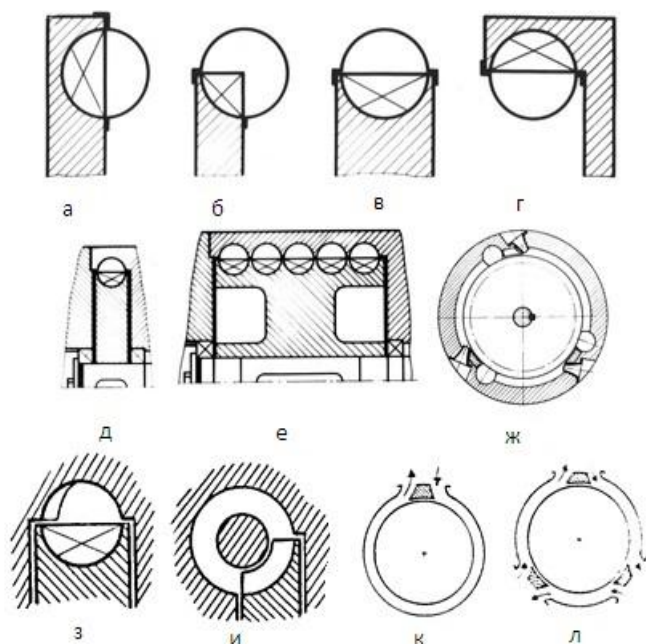


Рисунок 1 – Типы проточных частей

Несмотря на то, что с точки зрения образования продольно-вихревого течения боковое (рис. 1а) и внутреннее периферийное (рис. 1г) расположения канала в корпусе предпочтительнее, исследования машин с внешним периферийным каналом (рис. 1в) с целью повышения их эффективности дали определенные результаты. Так, в работе [6] организацией течения газа на входном участке проточной части с помощью сопла, определенным образом ориентированного относительно лопаток рабочего колеса, удалось повысить КПД вихревой расширительной машины с внешним периферийным каналом до 33 %. При этом была проведена визуализация потока и установлено, что шаг спирали спиралевидных линий тока от входа к выходу проточной части в окружном направлении увеличивается, и практически третья часть проточной части, примыкающая к выходному патрубку, используется очень неэффективно. В работе [7] применение направляющих неподвижных лопаток (рис. 1з) и расширение рабочего канала от входа к выходу, дополнительно к соплу, позволили достичь значений КПД для однопоточной проточной части с внешним периферийным каналом 42 – 46 % (без предоставления конкретных экспериментальных данных).

Проведенный анализ исследований уровня КПД вихревых расширительных турбомашин показал, что:

- из-за особенностей рабочего процесса, недостатка теоретических и экспериментальных исследований использование вихревых расширительных турбомашин ограничивается относительно низким значением КПД;
- существует интерес к вихревым ступеням с внешним периферийным каналом (рис.1в), так как они легко компонуются в многопоточные (рис. 1л), многоканальные (рис. 1е) и многоступенчатые машины, проще в изготовлении и имеют значительно меньшие осевые габариты;
- для более эффективного использования длины проточной части в окружном направлении, разгрузки ротора машины от радиальных усилий и увеличения производимой мощности целесообразно исполнение вихревой расширительной машины по многопоточной схеме;
- системные исследования многопоточных схем в литературных источниках отсутствуют, а известные значения КПД расширительных машин в многопоточном исполнении не превышают 30 %; данные по экспериментальным исследованиям многопоточных вихревых расширительных машин с внешним периферийным каналом отсутствуют.

ЦЕЛЬ СТАТЬИ И ВЫБОР ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

На основе анализа исследований и публикаций целью данной статьи является повышение эффективности и надежности вихревой расширительной машины путем применения двухпоточной проточной части и проведения вычислительного эксперимента.

При создании виртуального стенда для исследования вихревых турбомашин в качестве прототипа

был выбран экспериментальный стенд кафедры Э-5 МВТУ (МГТУ) им. Н. Э. Баумана, поскольку на этом стенде были выполнены обширные циклы исследований. В частности, на этом стенде испытывалась экспериментальная модель вихревой пневматической расширительной машины (турбины) с внешним периферийным каналом (рис. 2). Для данного стенда имеется техническая документация, позволяющая построить соответствующую полную геометрическую модель проточной части, а также подробные протоколы аэродинамических испытаний [6].

Для экспериментального исследования возможности повышения эффективности исследуемой машины путем организации газового потока на входном участке проточной части в конструкции экспериментальной модели было предусмотрено устройство (рис. 2), позволяющее изменять угол наклона и диаметр сопла, а также величину смещения оси сопла по ширине колеса. Для удобства изменения геометрических параметров сопла 1 рабочее колесо 2 расположено консольно на валу 3, установленном в цилиндрическом корпусе 4 на шарикоподшипниковых опорах 5. Для ограничения утечек по валу предусмотрено лабиринтное уплотнение 6. Из модели воздух отводится через выходной патрубок 7. Между входом и выходом расположен отсекающий 8. Радиальные и торцевые зазоры в процессе испытаний оставались постоянными и равными 0,15 и 0,2 мм соответственно.

В качестве объекта исследования в данной статье была принята проточная часть вихревой расширительной машины, показанной на рис. 2.

Основные геометрические параметры этой проточной части следующие:

- а) наружный диаметр рабочего колеса $D = 180$ мм;
- б) диаметр меридионального сечения проточной части $d = 22$ мм;
- в) угол установки лопаток (угол между кромкой лопатки и осью вращения колеса) $\beta_u = 100^\circ$;

г) угол наклона лопаток (угол между осью лопаток и направлением, обратным направлению окружающей скорости рабочего колеса) $\beta_l = 500^\circ$;

д) число лопаток $z = 48$;

е) меридиональное сечение проточной части – круглое;

ж) угол входа потока газа, истекающего из сопла на лопатки рабочего колеса, $\alpha_1 = 53^\circ$

з) диаметр выходного сечения сопла $d_c = 12$ мм;

и) величина смещения оси сопла по ширине колеса $a = 15,5$ мм.

Исходные данные для расчета:

а) рабочее тело – воздух;

б) полная температура на входе в проточную часть – 293 К;

в) диапазон изменения полного давления на входе в проточную часть – 0,18...0,47 МПа;

г) частота вращения ротора – 6 000 об/мин.

Проведение экспериментальных исследований на натуральных моделях связано с большими затратами времени и средств, так как варьирование геометрическими параметрами в широком диапазоне ведет к необходимости изготовления большого количества проточных частей. Также ограничена визуализация потока, что для вихревых машин имеет большое значение.

Виртуальный стенд позволяет значительно уменьшить затраты времени и средств на подготовку и проведение опытов, обработку и анализ результатов и дает возможность отработать методику и программу проведения испытания на натуральных стендах.

МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Численное исследование проводилось в программном комплексе ANSYS CFX. Комплекс хорошо зарекомендовал себя при решении задач газовой и гидродинамики.

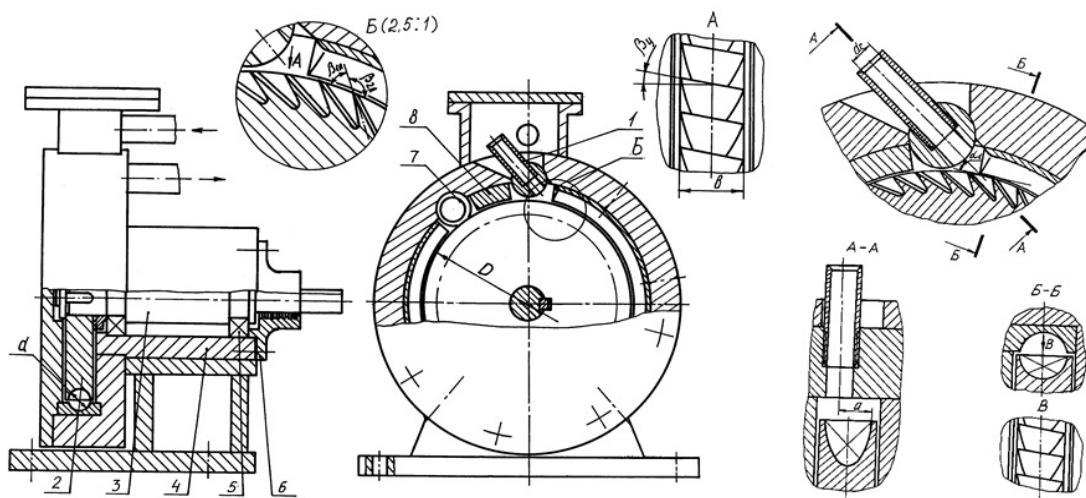


Рисунок 2 – Конструктивная схема экспериментальной модели и подводящего устройства

Основу данного программного продукта составляет метод численного решения системы уравнений Навье - Стокса и уравнения неразрывности, для замыкания которых используются разные модели турбулентности. Эти уравнения описывают фундаментальные законы газовой динамики и обеспечивают обоснованность применения данного метода при исследовании течения газа в проточной части вихревой расширительной машины.

Процесс расчёта состоит из пяти основных этапов:

1. *Создание геометрической модели (CAD-модели).* Моделирование расширительной машины выполняется в трёхмерной постановке в ANSYS Design Modeler.

2. *Создание сеточной модели* расширительной машины на базе геометрической модели. Разбиение твердотельной 3D-модели на ячейки производится в сеткогенераторе ANSYS Meshing (число элементов более 3 миллионов).

3. *Создание расчётной модели* из сеточной путём наложения расчётных условий. Моделирование турбулентных эффектов осуществлялось посредством SST модели. В качестве исходных данных для расчётов были приняты: полное давление на входе, полная температура на входе и статическое давление на выходе из расчетной области. Рабочее тело – вязкий сжимаемый воздух. Частота вращения задается домену RK. Шероховатость стенок проточной части задавалась равной 3 мкм.

4. *Поиск решения.* На данном этапе производится отыскание таких значений параметров в каждой расчётной ячейке, чтобы вся расчётная зона имела максимально верные уравнения потоков. В качестве критерия сходимости принимается условие достижения максимальными невязками параметрами течения значений ниже 10^{-4} либо отсутствие больших осцилляций в значениях выходных параметров (крутящего момента, массового расхода, конечной температуры).

5. *Анализа результатов расчёта.* Организован расчет и вывод на экран необходимых параметров (КПД, крутящего момента, расхода, мощности, температуры, давления). Также получаем визуализацию течения и распределение параметров по проточной части с помощью точек вычисления.

В модели учитывается влияние течения в радиальном зазоре под отсекателем.

Допущения: течение в торцевых зазорах между корпусом и рабочим колесом на данном этапе не моделируется; отсутствует теплообмен с окружающей средой; параметры потока считаются равномерно распределёнными по входному сечению.

Одним из основных безразмерных комплексов, характеризующих работу турбомашин и используемых при анализе результатов их исследований, является приведённая окружная скорость рабочего колеса \bar{U} . Этот комплекс характеризует оборотность и нагруженность расширительной турбомашин:

$$\bar{U} = \frac{U}{C_s} = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60 \cdot C_s},$$

где D - наружный диаметр рабочего колеса, м;
 n - частота вращения рабочего колеса, об/мин;

C_s - изоэнтропная скорость истечения, характеризует располагаемую удельную работу расширительной машины, м/с:

$$C_s = \sqrt{2h_s} = \sqrt{\frac{2k}{k-1} T_{\text{вх}}^* R \left[1 - \left(\frac{1}{\text{Пт}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]},$$

где h_s - удельный изоэнтропный перепад энтальпий (удельная располагаемая работа расширительной машины), Дж/кг;

k - показатель изоэнтропы рабочего тела;

R - удельная газовая постоянная, Дж/кгК;

$T_{\text{вх}}^*$ - температура торможения потока газа (полная температура) на входе в машину, К;

Пт – степень понижения давления в расширительной машине.

Адиабатный КПД при проведении вычислительного эксперимента определяется по формуле:

$$\eta = \frac{M_Z \cdot \omega}{h_s \cdot m} \approx \frac{(c_p)_{cp} \cdot (T_{\text{вх}}^* - T_{\text{вых}}^*)}{h_s},$$

где M_Z – крутящий момент на валу расширительной машины, Н·м;

ω – угловая скорость вращения ротора, рад/с;

m – потребляемый расход газа, кг/с;

$T_{\text{вых}}^*$ – полная температура на выходе из машины, К;

$(c_p)_{cp}$ – средняя изобарная массовая теплоёмкость воздуха для диапазона температур $T_{\text{вх}}^* - T_{\text{вых}}^*$.

При проведении вычислительных экспериментов значения h_s и ω определяются по исходным данным, а значения M_Z и m получаются в результате вычислительных экспериментов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На первом этапе исследования была проведена верификации получаемых вычислительным экспериментом данных для подтверждения корректной работы виртуального стенда и используемой методики.

На рисунке 3 показаны зависимости адиабатного (изоэнтропного) КПД от отношения давления на входе в расширительную машину к давлению на выходе из нее: зависимость, полученная в результате численных исследований (по методике, представленной выше), и зависимость, полученная на экспериментальном стенде (подробная информация о методике получения экспериментальной зависимости рис. 3 представлена в работе [6]). Из рисунка видно достаточно хорошее совпадение зависимостей.

На втором этапе были проанализированы данные визуализации потока и распределения газодинамических параметров по длине проточной части вихревой расширительной машины. На рисунках 4, 5, 6 показано распределение статического давления и полной температуры по длине рабочего канала в окружном направлении для отношений давлений Пт, соответствующих точкам на рис. 3.

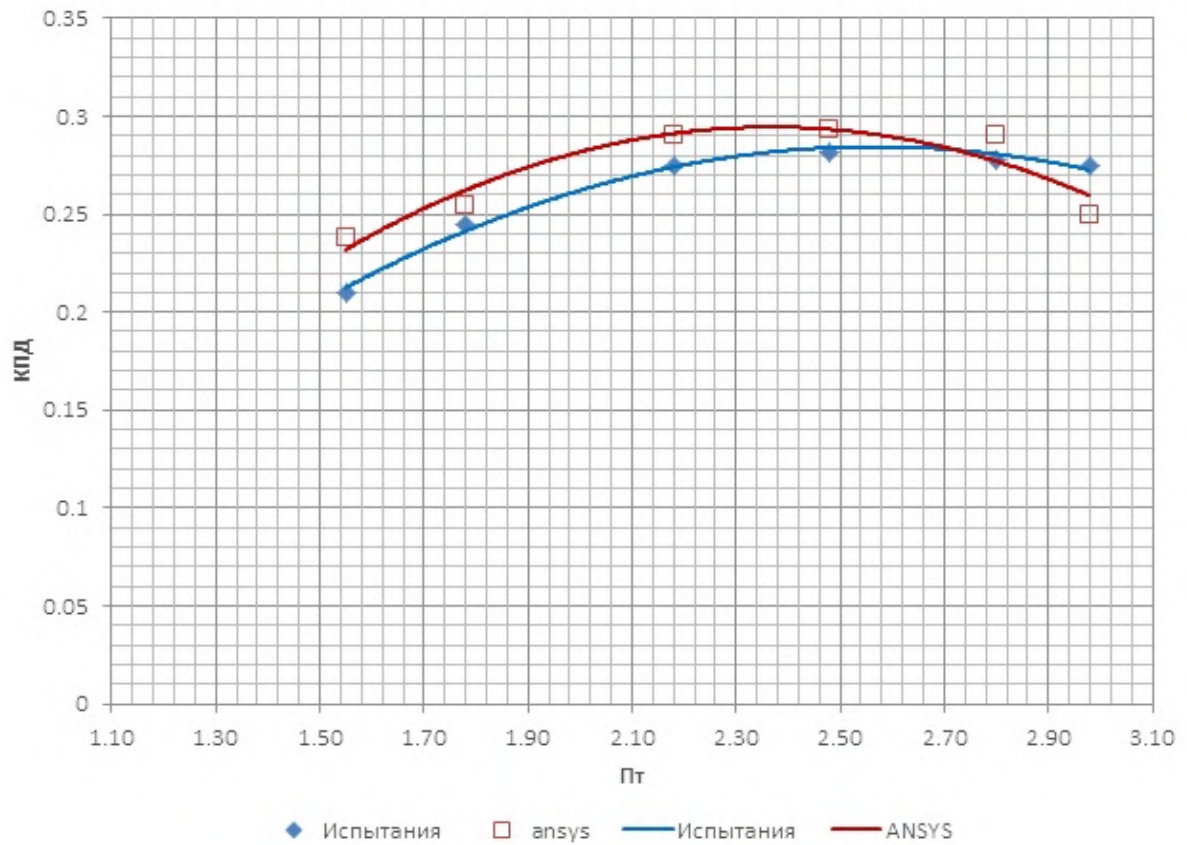


Рисунок 3 – Зависимость КПД от отношения входного и выходного давлений вихревой расширительной машины

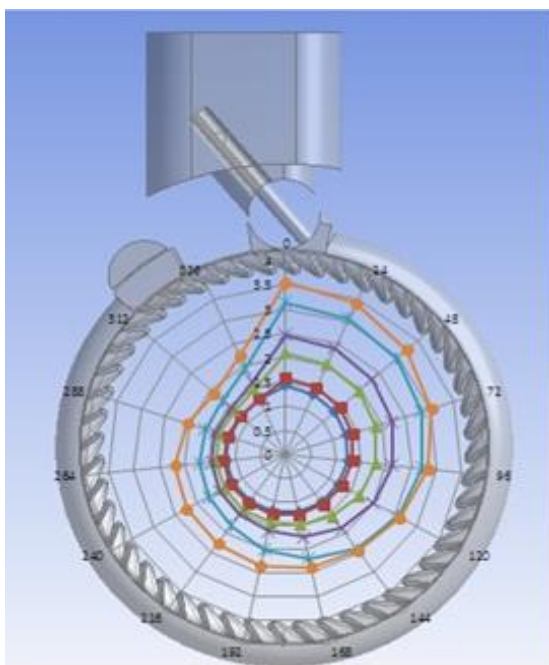


Рисунок 4 – Распределение статического давления по длине рабочего канала проточной части

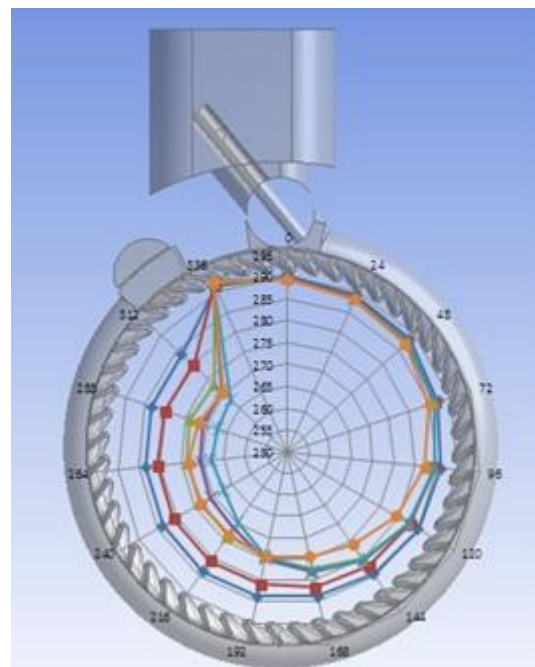


Рисунок 5 – Распределение полной температуры по длине рабочего канала проточной части

Из рис. 6 видно, что на выходном участке рабочего канала проточной части полная температура практически не изменяется, то есть на этом участке энергия потока не преобразуется в механическую работу на валу расширительной машины. Также видно, что угловая протяжённость участка с постоянной полной температурой в районе оптимума КПД для $P_T = 2,48$, $P_T = 2,8$ (см. рис. 3) меньше, чем на краевых режимах полученной на виртуальном стенде зависимости $\text{КПД} = f(P_T)$ (рис. 3), то есть при больших или меньших значениях P_T .

По длине проточной части вихревой ступени в окружном направлении имеется значительный градиент давления (см. рис. 4), что приводит к появлению радиальной силы давления, которая может быть значительной и вызывать износ опор и недопустимый прогиб вала и перекося колеса, что может привести к заеданию и поломке.

Для устранения радиальных нагрузок на подшипники и более эффективного использования длины проточной части было принято решение о необходимости перехода на многопоточную схему.

Были спланированы и проведены исследования с помощью теории планирования эксперимента. В ходе эксперимента исследовалось влияние на КПД двухпоточной проточной части приведённой окружной скорости рабочего колеса UI , наружного диаметра рабочего колеса D , диаметра проточной части d_{ph} , диаметра сопла d_s и угла наклона сопла α_{ns} при постоянных: частоте вращения ротора $n = 3000$ об/мин, отношении давления $P_T = 4$ и температуре на входе $T_{вх} = 293$ К.

Всего проведено 27 серий исследований при различных соотношениях вышеперечисленных исследуемых параметров согласно методике планирования эксперимента.

В таблице 1 приведены некоторые результаты для четырех соотношений исследуемых параметров. Эти соотношения в таблице 1 обозначены номерами 5, 7, 12, 23, взятыми из общей таблицы результатов исследования, и расположены в порядке убывания КПД. На рисунках 7 - 9 показано изменение давления (рис. 7) и полной температуры (рис. 8, 9) по длине рабочего канала в окружном направлении. На рисунках 10 - 13 представлены результаты визуализации течения газа в проточной части машины для режимов работы, соответствующих режимам, указанным в таблице 1.

Таблица 1 – Геометрические и газодинамические параметры проточных частей вихревых расширительных машин

| Номер проточной части | Приведенная окружная скорость | Наружный диаметр рабочего колеса | Диаметр проточной части | Диаметр сопла | Угол наклона сопла | Адиабатный КПД |
|-----------------------|-------------------------------|----------------------------------|-------------------------|------------------|-----------------------------|----------------|
| | UI | $D, \text{ м}$ | $d_{ph}, \text{ м}$ | $d_s, \text{ м}$ | $\alpha_{ns}, \text{ град}$ | КПД |
| № 5 | 0,15 | 0,419 | 0,025 | 0,008 | 40 | 0,45 |
| № 7 | 0,15 | 0,419 | 0,025 | 0,011 | 40 | 0,39 |
| № 23 | 0,10 | 0,279 | 0,025 | 0,008 | 40 | 0,33 |
| № 12 | 0,15 | 0,419 | 0,038 | 0,017 | 30 | 0,24 |

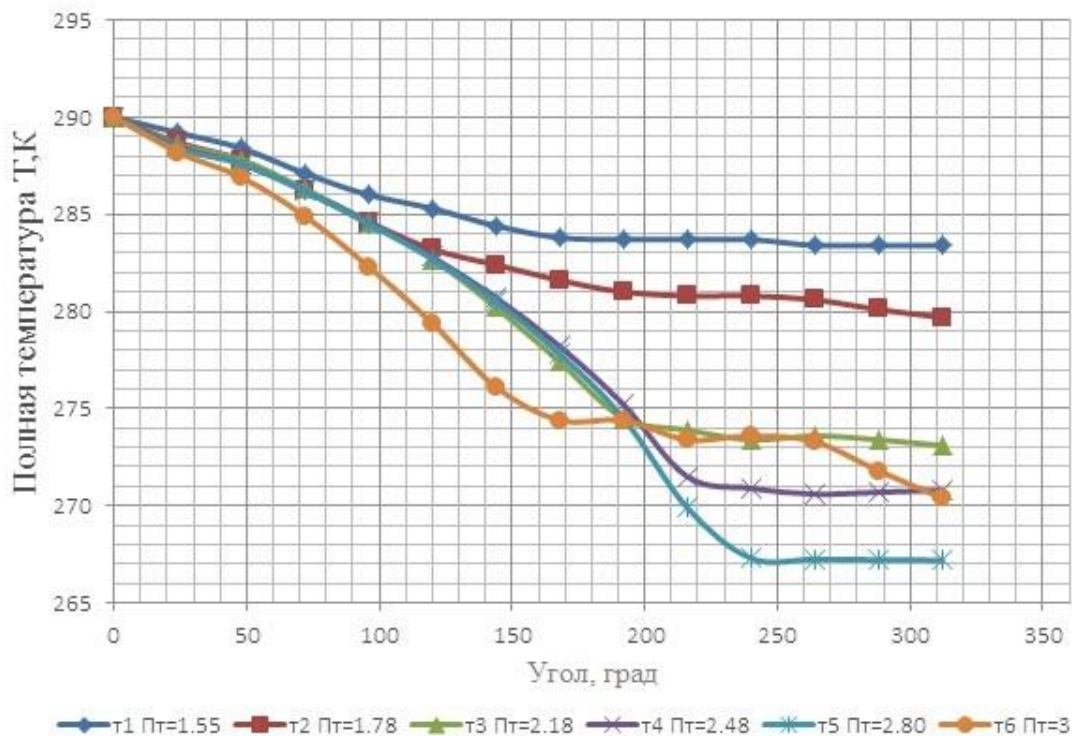


Рисунок 6 – Графики распределения полной температуры по длине рабочего канала однопоточной проточной части

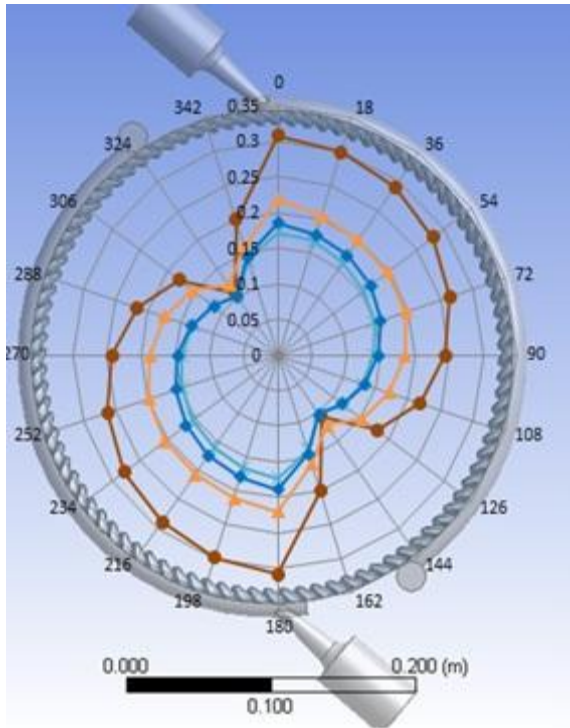


Рисунок 7 – Распределение статического давления по длине рабочего канала проточной части

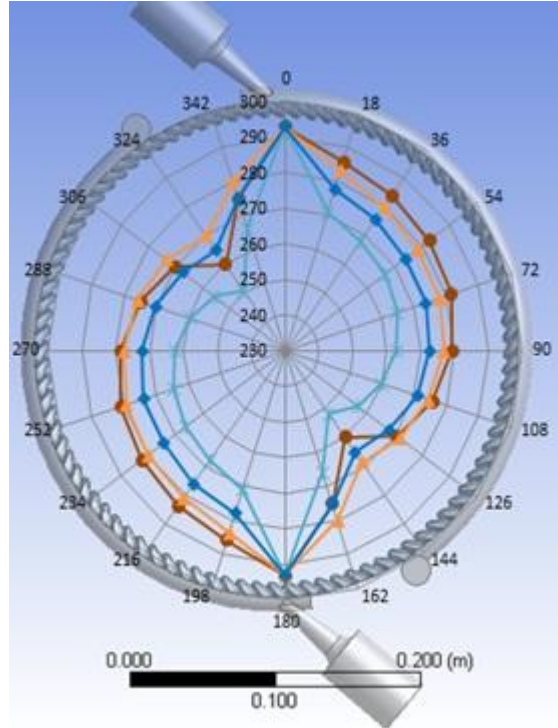


Рисунок 8 – Распределение полной температуры по длине рабочего канала проточной части

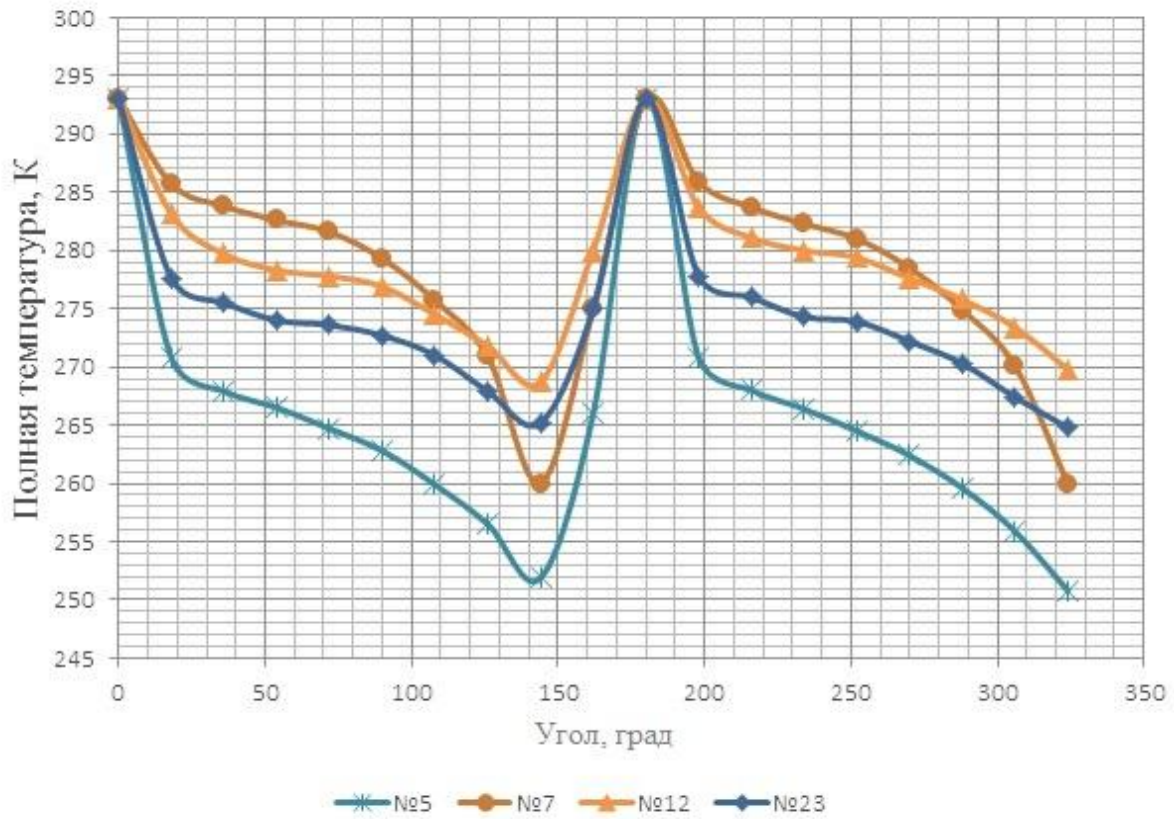


Рисунок 9 – Графики распределения полной температуры по длине рабочего канала двухпоточной проточной части

По визуализации течения видно, что на участках проточной части, где хорошо организовано продольно-вихревое движение, происходит эффективная передача энергии от потока газа лопаткам рабочего колеса, то есть преобразование энергии потока в работу на валу. На графиках рис. 9 - это участки, на которых полная температура стремительно уменьшается. На участках графиков с более пологими или горизонтальными участками поток не взаимодействует с лопатками рабочего колеса или взаимодействует с большими потерями из-за изменения условий натекания на лопатки.

Так, на рис. 9 (проточная часть № 7) видно, что на начальном участке происходит стремительное уменьшение полной температуры, что соответствует хорошо выраженному вихревому движению на этом участке (см. рис. 11). После 30 град. вихрь раскручи-

вается, и изменение полной температуры на участке 30 - 90 град. менее пологое. На выходном участке 90 - 140 град. вихревое взаимодействие снова улучшается. Подобная картина течения наблюдается и для проточных частей № 23 (рис. 12) и №12 (рис. 13), но изменяются протяжённость начального и выходного участков и структура вихревого движения газа. Так, для проточной части № 12, с наименьшим значением КПД (наименьшее снижение полной температуры от входа к выходу на рис. 9), после нескольких витков вихрь раскручивается и практически отсутствует до короткого выходного участка (рис. 13). Продольно-вихревое течение в проточной части № 5 сохраняется от входа к выходу на протяжении всего рабочего канала (рис. 10) и для этого режима имеем наибольшее снижение полной температуры (рис. 9) и высокий КПД (табл. 1).

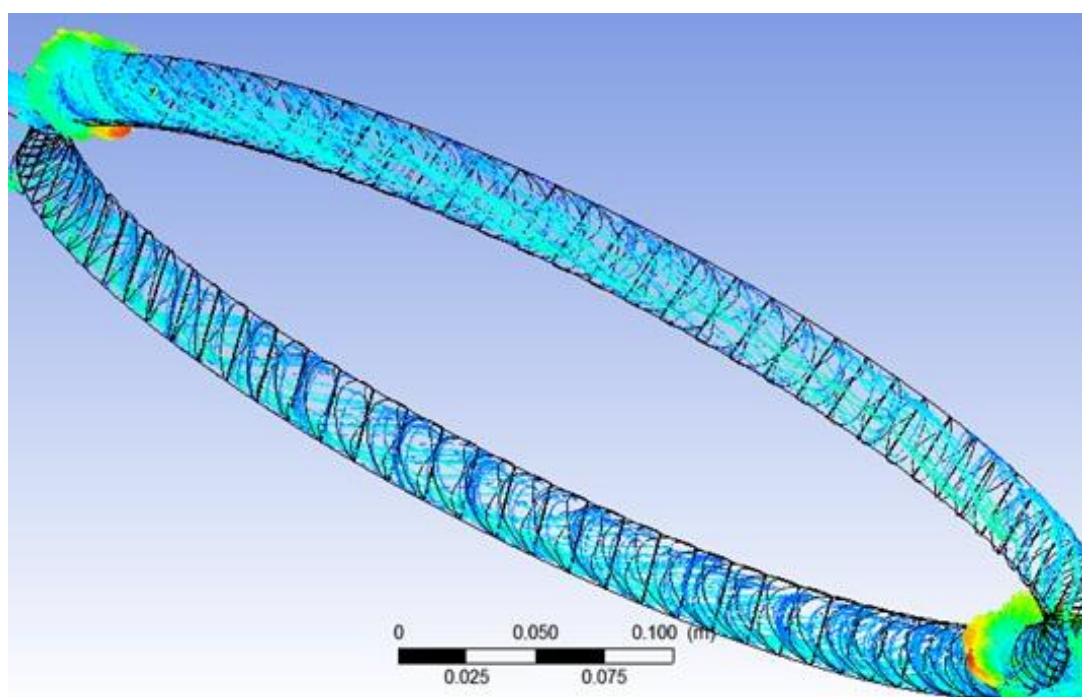


Рисунок 10 - Визуализация течения в проточной части № 5 вихревой расширительной машины с внешним периферийным каналом, КПД = 45 %

Таблица 2 - Геометрические и газодинамические параметры для усовершенствованной проточной части вихревой расширительной машины

| Приведенная окружная скорость | Наружный диаметр рабочего колеса | Диаметр проточной части | Диаметр сопла | Угол наклона сопла | Адиабатный КПД | Суммарный массовый расход | Мощность на валу | Частота вращения ротора | Отношение давлений |
|-------------------------------|----------------------------------|-------------------------|---------------|--------------------|----------------|---------------------------|------------------|-------------------------|--------------------|
| UI | D, м | dph, м | ds, м | alfa_ns, град | КПД | Gсум, кг/с | N, кВт | n, об/мин | Пт |
| 0,16 | 0,331 | 0,02 | 0,008 | 40 | 0,48 | 0,04 | 1 | 3000 | 2 |

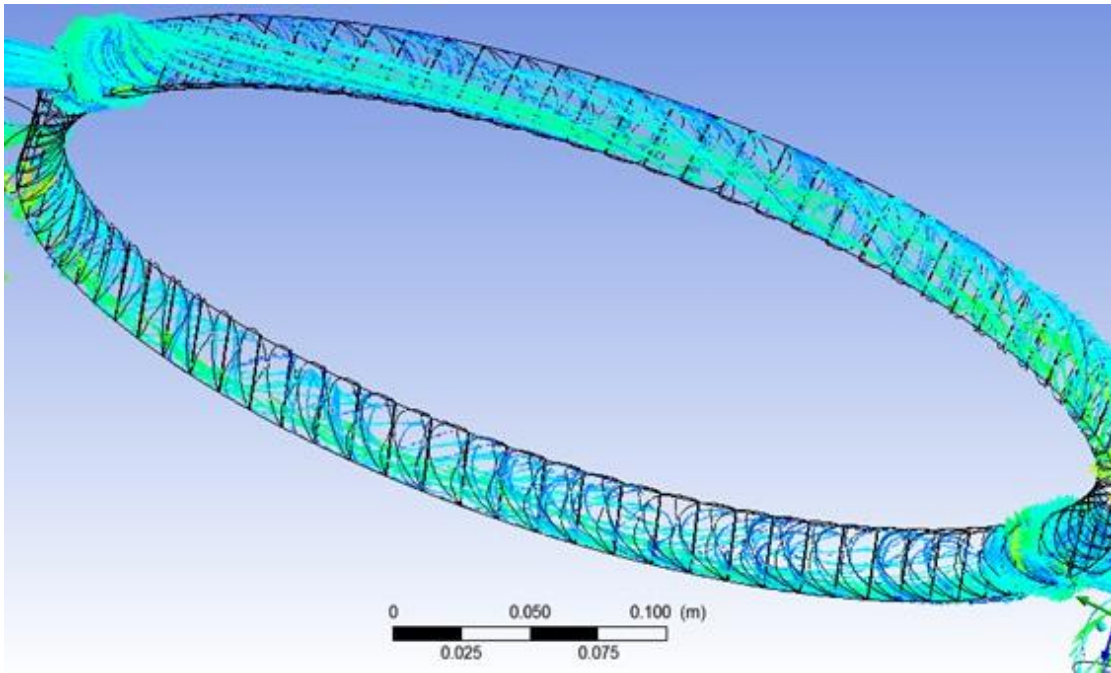


Рисунок 11 - Визуализация течения в проточной части № 7 вихревой расширительной машины с внешним периферийным каналом, КПД = 39 %

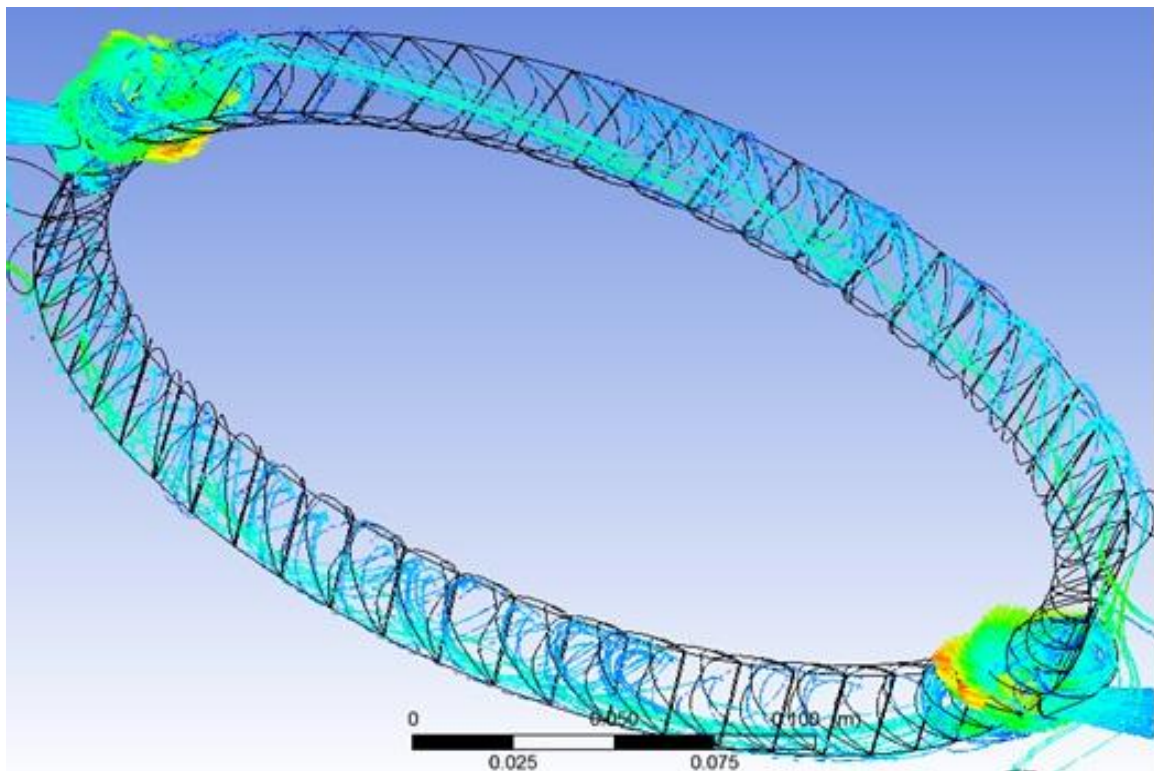


Рисунок 12 - Визуализация течения в проточной части № 23 вихревой расширительной машины с внешним периферийным каналом, КПД = 33 %

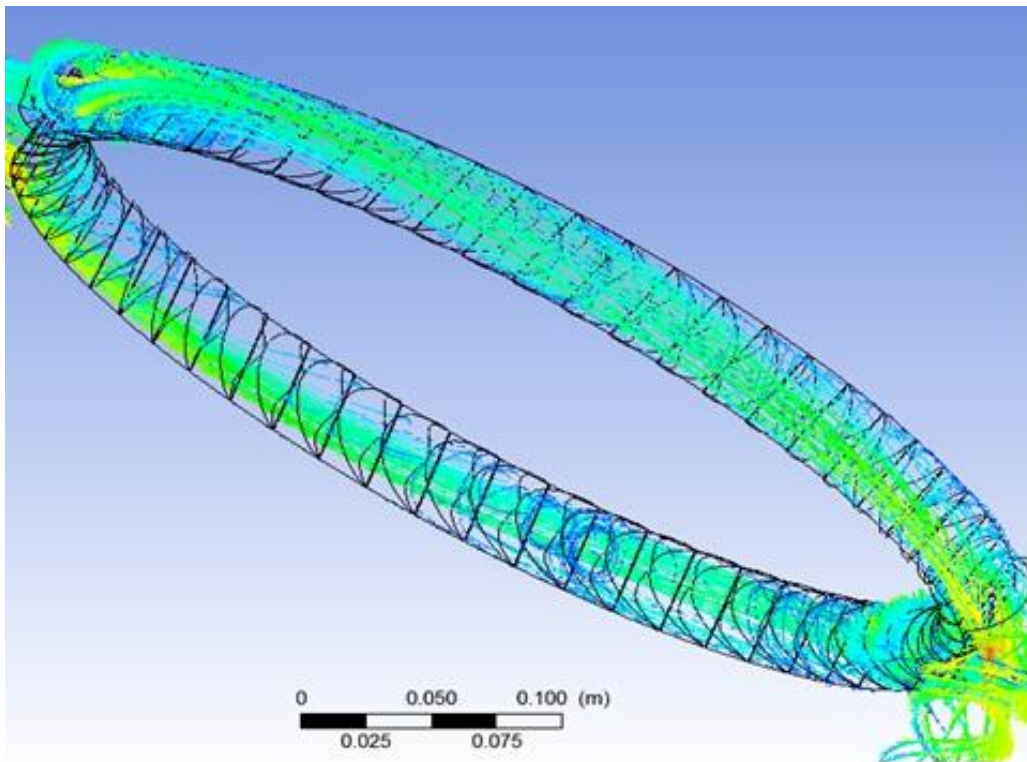


Рисунок 13 - Визуализация течения в проточной части № 12 вихревой расширительной машины с внешним периферийным каналом, КПД = 24 %

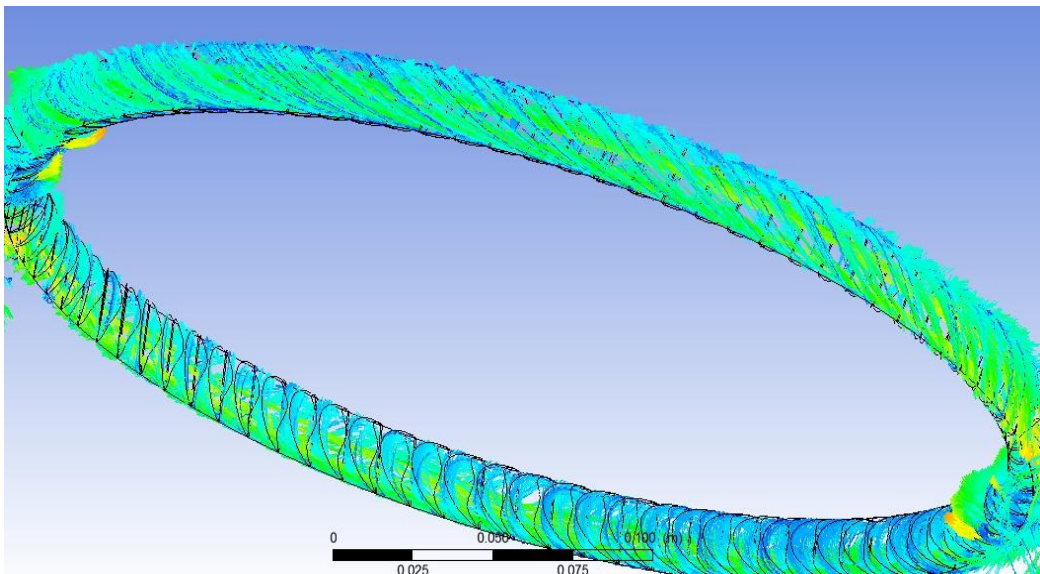


Рисунок 14 - Визуализация течения в усовершенствованной проточной части вихревой расширительной машины с внешним периферийным каналом, КПД = 48 %

С помощью виртуального стенда можно также быстро получить размерные и безразмерные характеристики проточной части, которые необходимы для анализа работы вихревой расширительной машины на режимах, которые могут возникнуть при эксплуатации.

Используя результаты анализа проведенных исследований (с помощью виртуального стенда) проточных частей была спроектирована проточная часть

для вихревой расширительной машины мощностью 1 кВт.

Для этой усовершенствованной проточной части были получены размерные и безразмерные характеристики, основные геометрические и режимные параметры для номинального режима, представленные в таблице 2. КПД этой проточной части составил 48 %, что на 18 % больше по сравнению с известными аналогами. Визуализация течения в усовершенство-

ванної проточної частини (рис. 14) показує дуже якісно сформоване подовжно-вихрове течіння по всій довжині проточної частини.

ВИВОДИ

1. Створено віртуальний стенд, що дозволяє дослідити вплив геометричних і газодинамічних параметрів на ККД і картину течіння в проточній частині вихрових розширювальних машин.

2. З допомогою візуалізації наочно показано вплив подовжно вихрового течіння на ККД проточної частини розширювальної машини з зовнішнім периферійним каналом: чим краще організовано це течіння, тим вище ККД машини.

3. Перехід на двупоточну схему дозволив більш ефективно використовувати довжину проточної частини, а також компенсувати радіальні навантаження на опори, що сприяє підвищенню ККД і надійності роботи вихрової розширювальної машини.

4. Спроектована двупоточна проточна частина вихрової розширювальної машини з зовнішнім периферійним каналом з розрахунковим ККД 48% і отримано її безрозмірні та розмірні характеристики. Збільшення ККД (на 18%) отримано без ускладнення конструкції (без застосування статорних направляючих лопаток, без зміни площі робочого каналу від входу до виходу і т.п.), але за рахунок організації подовжно вихрового руху на всій довжині робочого каналу проточної частини шляхом правильного вибору геометричних параметрів проточної частини.

Research vortex expansion machine with external peripheral channel using virtual test rig

S. M. Vaneev¹⁾, D. V. Miroshnichenko²⁾

^{1), 2)} *Sumy State University, 2, Rimsky Korsakov Str., Sumy, Ukraine, 40007*

Nowadays a promising direction in the energy sector is the development of small local power units. The implementation of projects on power supply by the introduction of low-power utilizing units based on the turbo-expander technologies is increasing.

The main obstacles to wider introduction of low-power (up to 0.5 MW) units are low efficiency, high cost and relative expenses for service in comparison with the powerful settings. For capacities up to 500 kW it is often possible to create units based on expansion vortex turbomachine in the gearless version. Advantages of the expansion vortex machine allow to obtain simple and reliable unit.

The objective of this work is to improve the efficiency and reliability of the expansion vortex machine by numerical research of gas flow in hydraulic components and the analysis of results.

The virtual test rig and methodology of research with the help of program complex ANSYS were created to achieve the objectives of the work. Data of computational experiments was verified to confirm the correct work of the virtual test rig and the methodology.

As a result, the influence of geometrical and gas-dynamic parameters on the flow pattern in the flow path of vortex expansion machine with a peripheral channel was established.

The improved flow path with estimated efficiency of 48% has been designed based on the analysis of the result of carried out research. Its dimensionless and dimensional characteristics were obtained.

Keywords: turbo-expander unit, vortex expansion machine, test rig, computational experiment, characteristics.

Випробування вихрової розширювальної машини із зовнішнім периферійним каналом за допомогою віртуального стенда

С. М. Ванєєв¹⁾, Д. В. Мірошніченко²⁾

^{1), 2)} *Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, Суми, Україна, 40007*

На цей час перспективним напрямком в енергетиці є розвиток малих локальних енергоустановок. Збільшується реалізація проектів з енергопостачання за рахунок упровадження малопотужних утилізаційних установок на базі турбодетандерної техніки.

Основними перешкодами на шляху широкого впровадження малопотужних (до 0,5 МВт) установок є низький для такої потужності ККД, високі вартість і відносні витрати на обслуговування порівняно з потужними установками. Для потужностей до 500 кВт часто можливе створення установок на базі вихрової розширювальної турбомашини в безредукторному виконанні. Переваги вихрової розширювальної машини дозволяють одержати установку максимально простою і надійною.

Метою цієї статті є підвищення ефективності та надійності вихрової розширювальної машини шляхом проведення чисельного дослідження течії газу в проточній частині та аналізу його результатів.

Для реалізації цілей роботи був створений віртуальний стенд і методика проведення досліджень за допомогою програмного комплексу ANSYS. Проведена верифікація одержаних обчислювальним експериментом даних для підтвердження коректної роботи віртуального стенда і використаної методики.

У результаті досліджень встановлено вплив геометричних і газодинамічних параметрів на картину течії в проточній частині вихрової розширювальної машини з периферійним каналом.

За результатами аналізу проведених досліджень була спроектована вдосконалена проточна частина з розрахунковим ККД 48 % та одержані її безрозмірні і розмірні характеристики.

Ключові слова: турбодетандерна установка, вихрова розширювальна машина, випробувальний стенд, обчислювальний експеримент, характеристики.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Грицына В. П. Стратегический план развития малых локальных энергоустановок в США // Промышленная энергетика. – 2001. - № 12. – С.50 - 53.
2. Vanyeyev S., Influence of gap between driving wheel and corps on characteristics of jet-reactive turbine / S. Vanyeyev, A. Bereznoi // Procedia Engineering. – 2012. – Vol. 39. – P. 1 - 8.
3. Vanyeyev Sergej, Jet-Reactive Turbine: Experimental Researches and Calculations by Means of Softwares / Sergej Vanyeyev, Viktor Getalo // Applied Mechanics and Materials. - 2014. – Vol. 630. – P. 66 – 71.
4. Байбаков О. В. Вихревые гидравлические машины. - М.: Машиностроение, - 1981. – 197 с.
5. Сергеев В. Н. Разработка пневмопривода вихревого типа с внутренним периферийным каналом и исследование влияния газодинамических и геометрических параметров на его эффективность : дис... канд. техн. наук : 05.04.06 / В. Н. Сергеев - М., 1983. - 127с.
6. Ванеев С. М. Разработка и исследование вихревого пневмопривода с внешним периферийным каналом и сопловым аппаратом : дис... канд. техн. наук : 05.04.06 / С. М. Ванеев. - М., 1986. - 183 с.
7. Староверов К. В. Совершенствование и исследование вихревой машины с периферийным каналом в режиме пневмопривода : дис... канд. техн. наук : 05.04.06 / К. В. Староверов. – М., 1990. - 128 с.

REFERENCES

1. Gritsyna V. P. Strategic plan for the development of small local power plants in the United States // Industrial Energy. – 2001. № 12. – S.50 - 53.
2. Vanyeyev S., Bereznoi A. Influence of gap between driving wheel and corps on characteristics of jet-reactive turbine / S. Vanyeyev, A. Bereznoi // Procedia Engineering. – 2012. – Vol. 39. – P. 1-8.
3. Vanyeyev Sergej, Getalo Viktor. Jet-Reactive Turbine: Experimental Researches and Calculations by Means of Softwares // Applied Mechanics and Materials. - 2014. – Vol. 630. – P. 66 – 71.
4. Baybakov O.V. Vortex hydraulic machines. - M.: Machinery. - 1981. – 197p.
5. Sergeev V. N. Development vortex actuator with an internal peripheral channel and research of the effect of gas-dynamic and geometric parameters of its effectiveness. Dissertation Candidate of Engineering Sciences. - M., 1983. – 127 p.
6. Vaneev S. M. Development and research vortex pneumo drive with an external peripheral channel and nozzle device. Dissertation Candidate of Engineering Sciences. - M., 1986. - 183 p.
7. Staroverov K. V. Improvement and research of vortex machine with a peripheral channel in pneumo drive mode. Dissertation Candidate of Engineering Sciences. – M., 1990. – 128 p.



Оценка шероховатости гладких поверхностей неметаллов микроинтерференционным методом

С. В. Сохань¹⁾, Й. Гавлик²⁾, М. Нимчевска-Войцек³⁾, Д. В. Ефросинин⁴⁾, Н. А. Мельник-Кагляк⁵⁾

^{1), 4), 5)} *Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, ул. Автозаводская, 2, г. Киев, Украина, 04074;*

^{2), 3)} *Краковский технический университет «Политехника Краковска», г. Краков, Польша*

Article info:

Paper received:

24 November 2015

The final version of the paper received:

09 December 2015

Paper accepted online:

10 December 2015

Correspondent Author's Address:

¹⁾ svsokh@ukr.net

Оценка шероховатости поверхностей, характеризуемых $Ra \leq 0,01$ мкм, может быть выполнена измерительной системой «Micron-alpha» на базе оптического прибора МИИ-4. Устройство цифровой фиксации последнего позволяет сканировать участок поверхности размером не более 250×190 мкм. Однако в этом случае из регламентированных стандартом ISO величины базовой длины (0,08 мм) и соотношения базовой длины и длины оценки (0,08/0,4) последнее не выполняется. В статье показано, что значения параметров шероховатости поверхности таких материалов, как сапфир и керамика на основе диоксида циркония, определенные указанной измерительной системой, сопоставимы с результатами оценки шероховатости, полученными при сканировании участка поверхности на порядок большего размера. Вместе с тем большая чувствительность такой методики оценки к местным дефектам поверхности – выходам пор на поверхность, мелким выколкам, царапинам, требует использовать при измерении не менее 10 трасс оценки.

Ключевые слова: шероховатость поверхности сапфира, керамика на основе диоксида циркония, микроинтерференционный метод оценки, сканирующая измерительная система на базе оптического прибора МИИ-4, параметры шероховатости.

ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития электроники, электротехники, машиностроения, медицинской техники возрастает спрос на изделия из высококачественных материалов, для которых точность изготовления и качество поверхности являются ключевыми факторами, определяющими длительность их срока службы. Ввиду большого разнообразия форм и размеров таких изделий и зачастую сравнительно небольших объемов выпуска для их производства лучше всего подходят высокоточные механообрабатывающие центры, которые могут выполнять сложные технологические переходы и в то же время обладают высокой гибкостью переналадки [1]. Для того чтобы снизить стоимость производства, изготовители заинтересованы в развитии простых и достоверных методов контроля, пригодных для повседневной производственной работы и с высокой степенью количественной точности и повторяемости данных. Одним из показателей качества обработанной поверхности является ее геометрическая структура, то есть набор микро- и макрогеометрических отклонений от номинального контура заданной чертежом поверхности. Между этими видами погрешностей нет четкого физического различия, однако условно их можно разделить по отношению шага S к значению

отклонения Δ от номинального контура. Неровности, для которых отношение $S/\Delta < 40$, относят к шероховатости, при $1000 > S/\Delta > 40$ – к волнистости, при $S/\Delta > 1000$ – к отклонениям формы.

Во многих технических приложениях точная характеристика шероховатости поверхности является задачей первостепенной важности из-за ее значительного влияния на функциональные возможности произведенных продуктов (Whitehouse 2011) [2]. Например, в отдельных случаях трибологии шероховатость поверхности влияет на адгезию, блеск, трение и износ в условиях влажной или сухой среды (Yang, 2008) [3]. Топографический метод является наиболее осуществимым в оценке шероховатости обработанной поверхности произведенных продуктов. Из-за возрастающего интереса науки и промышленности распространение параметров шероховатости, иногда исчисляемое сотнями, было вызвано необходимостью не только описать различные виды морфологии, особенно поверхностей со специальными функциями, свойствами или назначением, но также и характеризовать деградацию материалов, подчиняющуюся различным трибологическим механизмам. Несмотря на такое увеличение количества параметров, названное «сыпью параметров» (Whitehouse, 1982) [4], все еще нет полного всестороннего представления относительно уместности

этих параметров шероховатости (Kubiak, 2011) [5]. При оценке шероховатости поверхности возникают и некоторые специфические метрологические проблемы. Чертежом, как правило, задаются требования к шероховатости всей рабочей поверхности детали. Контроль соблюдения этих требований осуществляется обычно по некоторому числу профилей ограниченной длины. При этом возникают вопросы, связанные с выбором исследуемых профилей: какой длины должен быть каждый исследуемый профиль, т. е. участок оценки; сколько должно исследоваться таких участков; какие участки выбирать для измерений, чтобы оценить качество поверхности в целом.

Для получения прецизионных изделий из сапфира, керамики на основе диоксида циркония применяют методы алмазной обработки. В случае прецизионной алмазной обработки изделий с точностью формы ≤ 1 мкм из указанных труднообрабатываемых материалов, например наружной и внутренней сферической поверхности керамических компонентов эндопротеза тазобедренного сустава человека, проблема состоит в обеспечении шероховатости поверхности изделия, характеризуемой параметром R_a 0,01 – 0,02 мкм и ниже (рис. 1) [6].

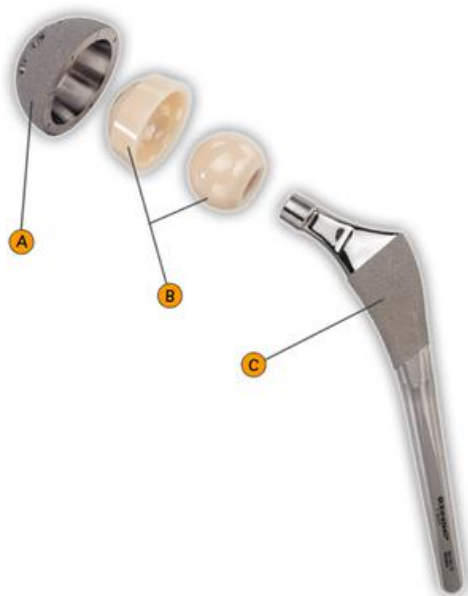


Рисунок 1 – Компоненты эндопротеза тазобедренного сустава человека: а - ацетабулярная чаша; в - керамические головка и вкладыш; с - ножка

Для оценки шероховатости таких «гладких» поверхностей используют бесконтактные методы, среди которых - микроинтерференционный. Метод реализуется с помощью оптических приборов типа МИИ-4, МИИ-5 и ряда других. Эти оптические приборы представляют собой микроинтерферометр В. П. Линника (сочетание интерферометра Майкельсона с измерительным микроскопом) и служат для лабораторных измерений параметров R_z и S и фотографирования микронеровностей поверхностей с $R_z = 0,03 - 1$ мкм. Принцип работы приборов основан на получении в поле зрения микроскопа увеличенного изображения интерференционной картины. В местах выступов и впадин на исследуемой поверхно-

сти интерференционные полосы искривляются. Степень искривления полос и характеризует неровность поверхности. Современные сканирующие измерительные системы, например, такие как «Микрон-Альфа» на базе оптического прибора МИИ-4, оснащены устройством для цифровой фиксации данных и последующей передачи их для обработки на персональный компьютер.

Параметрами шероховатости рабочих поверхностей деталей машин, влияющими на их эксплуатационные характеристики, являются согласно ГОСТ 25142-82 [7]: среднее арифметическое отклонение профиля R_a , среднее квадратичное отклонение профиля R_q , высота наибольшего выступа профиля R_p , средний шаг неровностей профиля S_m , относительная опорная длина профиля t_p и наибольшая высота неровностей профиля R_{max} . Стандарт ISO 4287:1997 [8] оперирует с такими же параметрами описания профиля – R_a , R_q , R_p , S_m , t_p , R_t (R_{max}), а также R_v (глубина наибольшей впадины профиля), R_z (высота неровностей профиля по десяти точкам, применяют в случаях, когда $R_a < 0,01$ мкм) и R_{ku} (степень заостренности неровностей профиля). Стандарт ДСТУ ISO 12085-2001 [9] рекомендует использовать средний шаг структурных элементов шероховатости AR (S_m), среднюю глубину элементов R и максимальную глубину структурных неровностей R_x (R_{max}).

В настоящее время считается, что параметр R_a является малочувствительным к элементам топографии поверхности (выступам или впадинам). Поэтому склоняются к анализу другого амплитудного параметра R_q (среднего квадратичного отклонения шероховатости), более чувствительного в этом отношении. Параметр R_{ku} является мерой выгнутости кривой несущей способности поверхности и очень чувствителен к местным неровностям (выступам или впадинам). При значении $R_{ku} = 3$ мы имеем дело с нормальным распределением ординат кривой несущей способности поверхности. В случае, когда параметр R_{ku} достигает 20, это означает, что распределение ординат имеет либо высокие выступы (что маловероятно в случае финишной обработки), либо глубокие впадины.

Для оценки шероховатости поверхностей непериодического профиля, характеризуемой $R_a < 0,02$ мкм, стандартом ISO 4288:1996 [10] регламентирована величина базовой длины (0,08 мм) и соотношение базовой длины и длины оценки (0,08/0,4). Строго говоря, выбор базовой длины должен быть сделан после изучения периодичности особенностей профиля (пиков и впадин), вызванной процессом механической обработки. Используют эмпирическое правило – базовая длина l_s должна быть установлена приблизительно в пять раз меньше, чем эта периодичность.

Поскольку у сканирующей измерительной системы на базе оптического прибора МИИ-4 размеры участка сканирования зависят от возможностей устройства цифровой фиксации (250×190 мкм) и являются существенно (до 2 раз) меньшими, чем регламентированная длина оценки, важным является вопрос достоверности получаемых таким способом результатов оценки шероховатости. Целью настоящего исследования было сравнить результаты оцен-

ки шероховатости гладкой поверхности микроинтерференционным методом с использованием оптического прибора МИИ-4 с результатами 2D-анализа шероховатости той же поверхности, полученными после сканирования геометрической структуры участка поверхности размером 1,64×1,64 мм.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Шероховатость поверхности оценивали на образцах в виде плоских плиток размерами 36×19×6 мм из промышленного сапфира и керамики на основе нанопорошка диоксида циркония (рис. 2).



Рисунок 2 – Плоские образцы из сапфира и керамики диоксида циркония

Заготовки из указанных материалов были изготовлены в институтах НАН Украины: соответственно сотрудниками Харьковского института монокристаллов и Донецкого физико-технического института им. А. А. Галкина. Некоторые физико-механические свойства этих материалов приведены в табл. 1.

Методика подготовки образцов предусматривала их алмазное шлифование на плоскошлифовальном станке для обеспечения габаритных размеров и исправления погрешностей формы после спекания или разрезания. Далее исследуемую поверхность образцов доводили на полировально-доводочном станке

типа ЗПД-320, используя для предварительной доводки притир из чугуна и водную суспензию алмазного микропорошка зернистостью 40/28. Плитки доводили до тех пор, пока поверхность граней всех плиток не становилась полностью матовой, после чего переходили на водную суспензию алмазного микропорошка зернистостью 14/10, на которой обеспечивали съём припуска толщиной не менее 40 мкм. Окончательную доводку поверхности выполняли на притире из текстолита, используя водную суспензию алмазного микропорошка зернистостью 5/3, на которой обеспечивали съём припуска толщиной не менее 3 – 5 мкм.

Шероховатость поверхности образцов оценивали при помощи бесконтактной сканирующей измерительной системы (БСИС) «Micron-alpha» на базе оптического прибора МИИ-4. Внешний вид оптического прибора МИИ-4 показан на рис. 3 а (позиция 1 – корпус; 2 – предметный столик; 3 – кольцо ирисовой диафрагмы; 4 – винт изменения ширины интерференционных полос; 5 – рукоятка включения шторки; 6 – микрометрический винт перемещения интерференционной головки; 7 – цифровая камера; 8 – кнопка включения; 9 – индикатор отсутствия связи с камерой; 10 – индикатор связи с камерой; 11 – лампа-источник белого света; 12 – выдвигающаяся пластинка с отверстием-ирисовой диафрагмой).

БСИС «Micron-alpha» позволяет получать цифровое 2D-изображение участка, например, плоской или сферической поверхности размером 250×190 мкм при увеличении ×320, а также количественно оценивать шероховатость поверхности путем компьютерной обработки последовательности интерференционных данных (картин), регистрируемых цифровой камерой в белом свете. Кроме того, система позволяет строить по полученным данным 3D-картину отсканированного участка исследуемой поверхности.

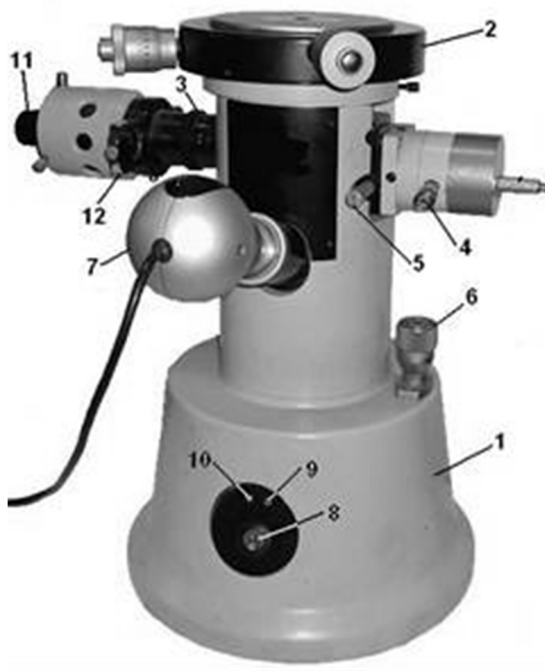
Технические характеристики БСИС «Micron-alpha»:

Поле сканирования (X, Y), мкм 250×190
 Разрешение по горизонтали (X, Y), мкм 0,16
 Максимальная измеряемая высота рельефа (Z), мкм..... 40
 Разрешение по вертикали (Z), нм 3

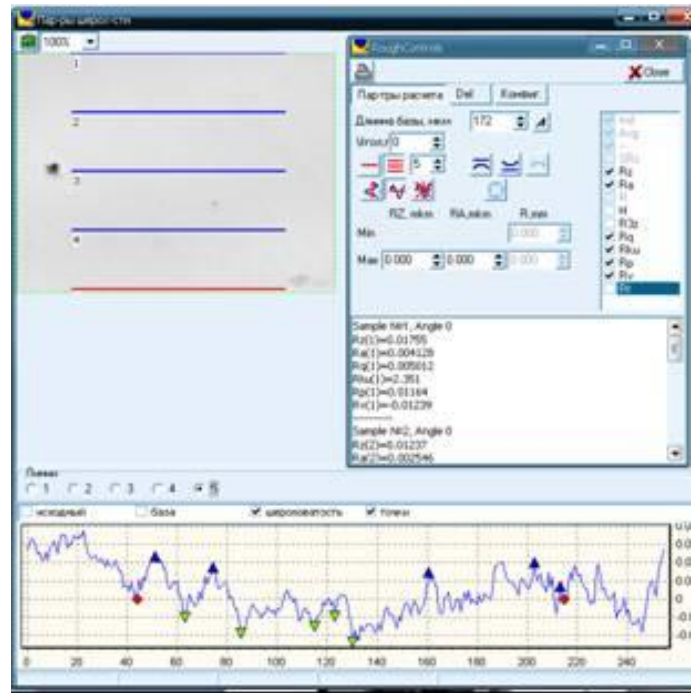
Таблица 1 - Некоторые физико-механические свойства сапфира и керамики на основе нанопорошка диоксида циркония (ZrO₂) [11]

| Показатель | Сапфир | ZrO ₂ -керамика* |
|--|-----------|-----------------------------|
| Прочность при изгибе, Мпа | > 400 | 850 |
| Критическая интенсивность трещинообразования K _{1с} , МПа·м ^{-1/2} | 3,5 | 8 - 11 |
| Модуль Юнга, Гпа | 400 | 209 |
| Плотность, г/см ³ | 3,99 | 6,05 |
| Микротвердость, Гпа | 19,4 - 22 | 10 - 12 |

* Керамика химического состава (ZrO₂(+HfO₂) – основной компонент, Y₂O₃ – 5,3 %, Al₂O₃ – < 0,05%, Fe₂O₃ – < 0,01 %, SiO₂ – < 0,02 %), содержание тетрагональной фазы 96 %, моноклинной 4 %.



а



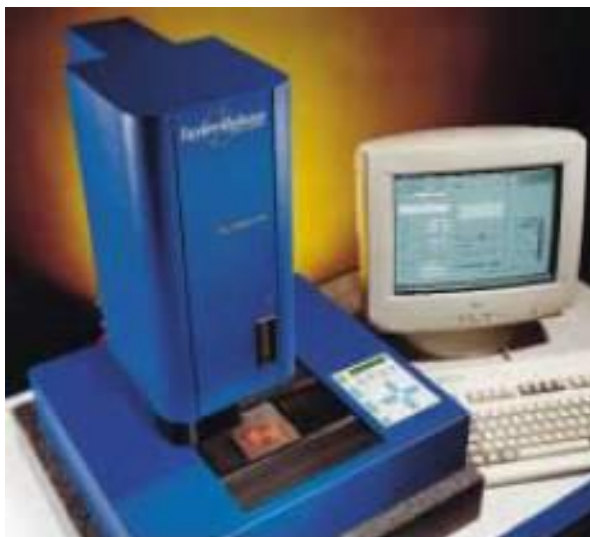
б

Рисунок 3 - Внешний вид оптического прибора МИИ-4 (а) и интерфейса бесконтактной сканирующей измерительной системы «Micron-alpha» (б)

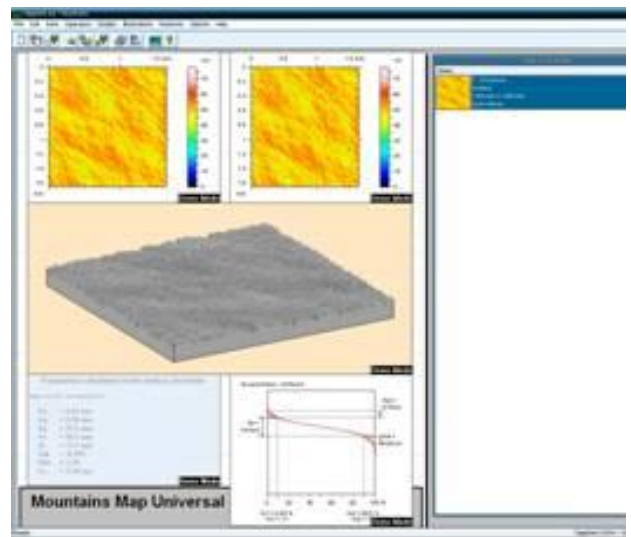
Полученные при помощи БСИС «Micron-alpha» результаты оценки шероховатости поверхности образцов сапфира и керамики диоксида циркония сравнивали с результатами 2D анализа, полученными после сканирования геометрической структуры участка поверхности на 3D сканирующей измерительной системе «Talyscan 150» (рис. 4, а). Она позволяет сканировать топографию участка поверхности размером до 10×10 мм, а программное обеспечение,

например «3D Surface Texture Mountains Map» (рис. 4 б), позволяет выполнять не только 2D-, но и 3D-анализ геометрической структуры поверхности.

Расположение трасс оценки шероховатости участков поверхности размером 250×190 мкм (при использовании БСИС «Micron-alpha») показано на рис. 5 а, образцов размером 1,64×1,64 мм (при использовании системы «Talyscan 150», выделена 1-я трасса оценки) – на рис. 5 б.



а



б

Рисунок 4 – Внешний вид 3D-сканирующей измерительной системы «Talyscan 150» (а) и интерфейса программной среды «Mountains Map» (б).

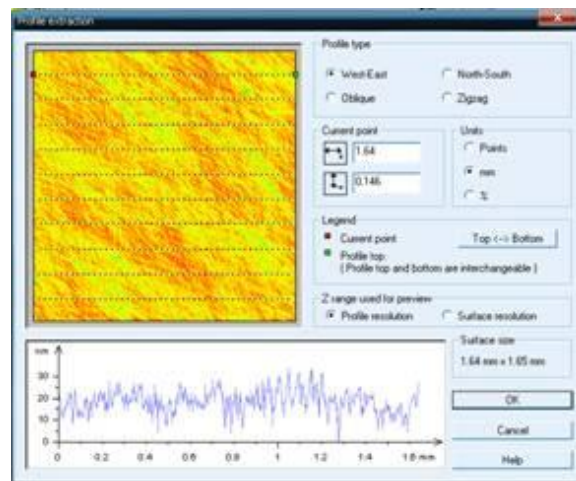


Рисунок 5 – Расположение трасс оценки шероховатости участков поверхности: размером 250×190 мкм (а) и размером 1,64×1,64 мм (б).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В табл. 2 представлены средние значения параметров шероховатости поверхности образцов, рассчитанные по десяти трассам оценки, расположение которых показано на рис. 5 (при измерении при помощи БСИС «Micron-alpha» – трассы 2 - 11), и их среднеквадратичные отклонения. Значения S_m и tp определены на уровне средней линии для трассы, на которой величина R_t оказалась наиболее близкой к указанному в табл. 2 среднему значению. Согласно рекомендациям статистической обработки данных при вычислении средних значений параметров исключены с доверительной вероятностью 0,90 резко выделяющиеся результаты измерений (см. табл. 2).

Изображение участка поверхности размером 250×190 мкм образца керамики, полученное при помощи БСИС «Micron-alpha», 3D-картина этого участка поверхности, а также профилограмма профиля поверхности вдоль 10-й трассы, для которой величина R_t оказалась наиболее близкой (0,0159 мкм) к указанному в табл. 2 среднему значению, показаны на рис. 6.

На рис. 7 показано 3D-изображение участка поверхности размером 1,64×1,64 мм образца керамики,

полученное в программной среде «Mountains Map», а также профилограмма профиля и значения параметров шероховатости поверхности вдоль 10-й трассы, для которой величина R_t оказалась наиболее близкой (0,0310 мкм) к указанному в табл. 2 среднему значению.

Изображение участка поверхности размером 250×190 мкм образца сапфира, полученное при помощи БСИС «Micron-alpha», 3D-картина этого участка поверхности, а также профилограмма профиля поверхности вдоль 5-й трассы, для которой величина R_t оказалась наиболее близкой (0,0192 мкм) к указанному в табл. 2 среднему значению, показаны на рис. 8.

На рис. 9 показано 3D изображение участка поверхности размером 1,64×1,64 мм образца сапфира, полученное в программной среде «Mountains Map», а также профилограммы профиля и значения параметров шероховатости поверхности вдоль 8-й трассы, для которой величина R_t оказалась наиболее близкой (0,00892 мкм) к указанному в табл. 2 среднему значению.

Таблица 2 - Параметры шероховатости поверхности керамики диоксида циркония и сапфира

| Параметр, размерность Материал образца, прибор | | Параметры шероховатости поверхности | | | | | | | | |
|---|---------------|-------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------|----------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| | | R_a , мкм | R_q , мкм | R_p , мкм | S_m , мкм | tp , % | R_t , мкм | R_z , мкм | Rku | Rv , мкм |
| Керамика на основе нанопорошка ZrO ₂ | Micron-alpha | 0,0030* ¹ ± 0,0006 | 0,0039* ¹ ± 0,0010 | 0,0087 ± 0,0018 | 22,0 | 65,6 | 0,0157* ⁴ ± 0,0031 | 0,0114* ¹ ± 0,0088 | 3,572* ² ± 1,355 | 0,0078* ⁴ ± 0,0022 |
| | Taly-scan 150 | 0,0042 ± 0,0004 | 0,0053 ± 0,0007 | 0,0153 ± 0,0019 | – | 60,3 | 0,0321* ¹ ± 0,0034 | 0,0317* ¹ ± 0,0038 | 3,206* ¹ ± 0,388 | 0,0166* ¹ ± 0,0029 |
| Сапфир | Micron-alpha | 0,0032* ² ± 0,0005 | 0,0040* ² ± 0,0005 | 0,0094* ¹ ± 0,0024 | 22,9 | 50,4 | 0,0187* ¹ ± 0,0045 | 0,0110* ² ± 0,0014 | 2,991* ² ± 0,691 | 0,0104* ² ± 0,0024 |
| | Taly-scan 150 | 0,0021* ¹ ± 0,0010 | 0,0029* ¹ ± 0,0016 | 0,0046* ¹ ± 0,0013 | – | 56,4 | 0,0119* ⁴ ± 0,0046 | 0,0115* ⁴ ± 0,0045 | 3,062* ⁴ ± 0,711 | 0,0073* ⁴ ± 0,0034 |

* – исключены резко выделяющиеся результаты измерений, следующей цифрой показано количество исключенных значений

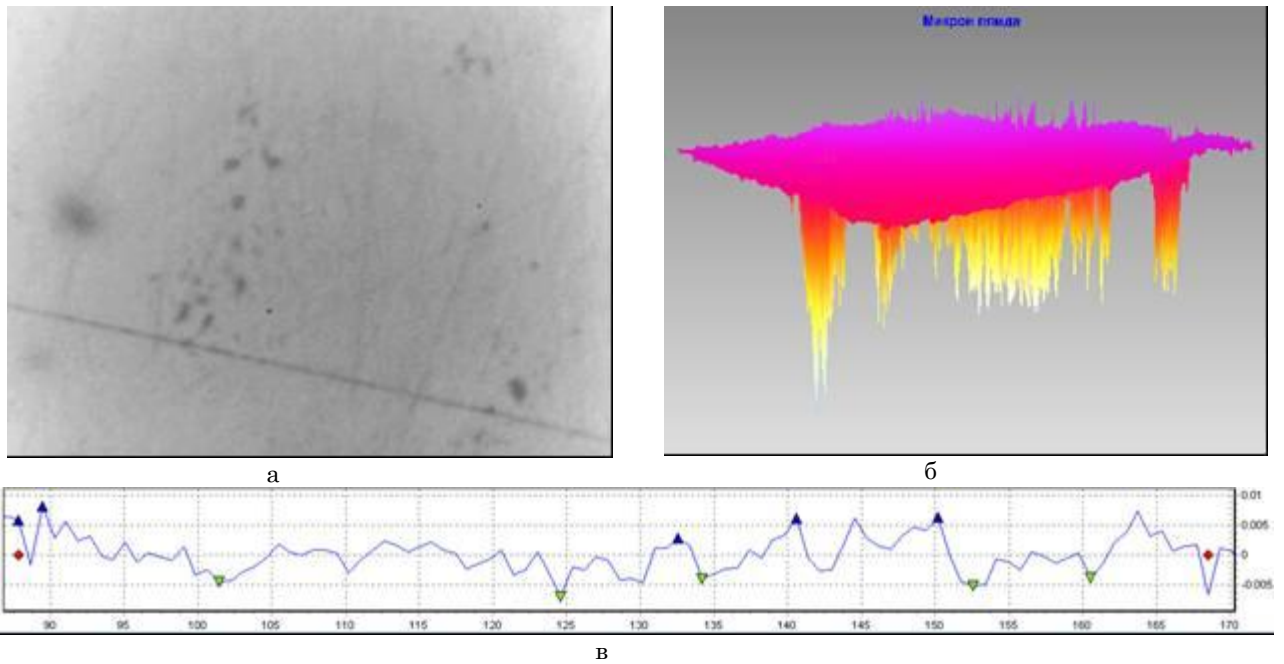


Рисунок 6 – Изображение участка поверхности образца керамики (а), 3D-картина этого участка поверхности (б), а также профилограмма профиля поверхности вдоль 10-й трассы оценки (в)

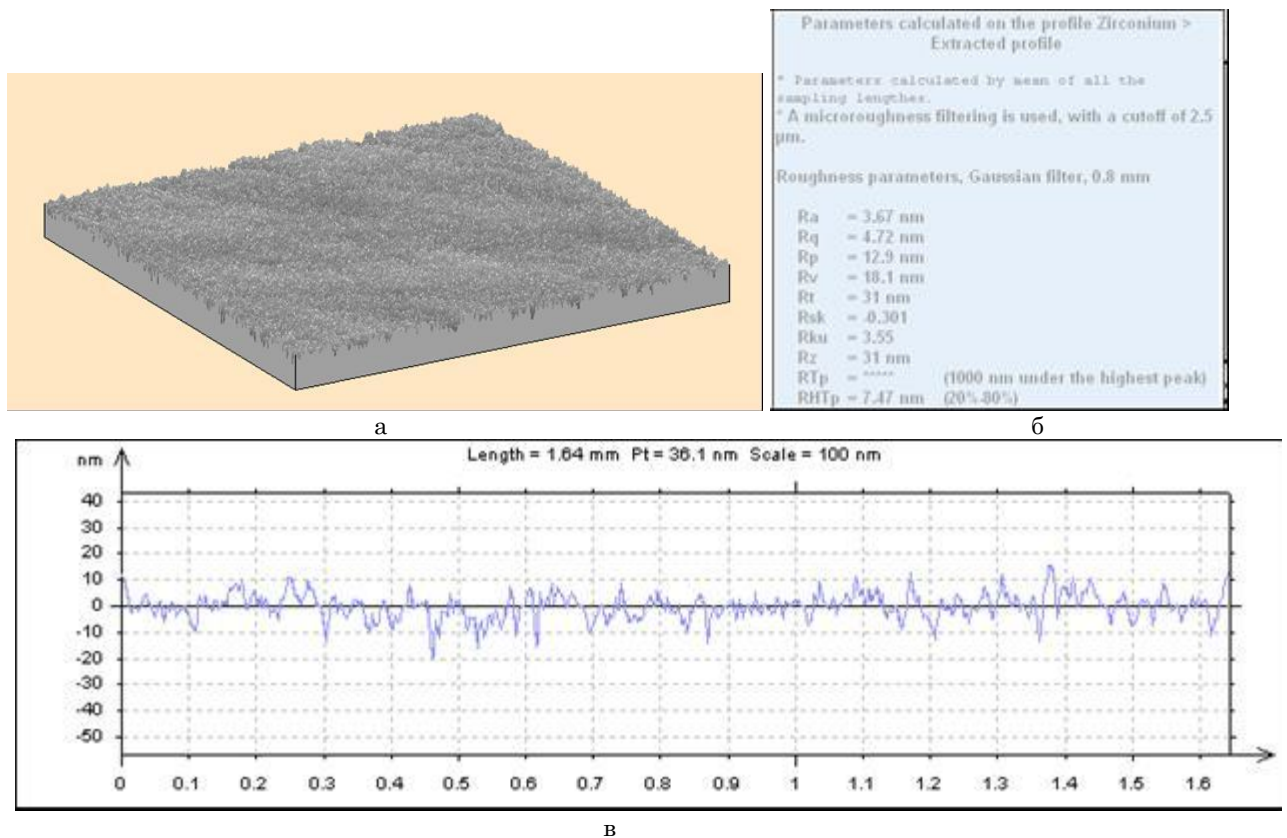


Рис. 7 – 3D-изображение участка поверхности образца керамики (а), параметры шероховатости (б) и профилограмма профиля поверхности (в) вдоль 10-й трассы оценки

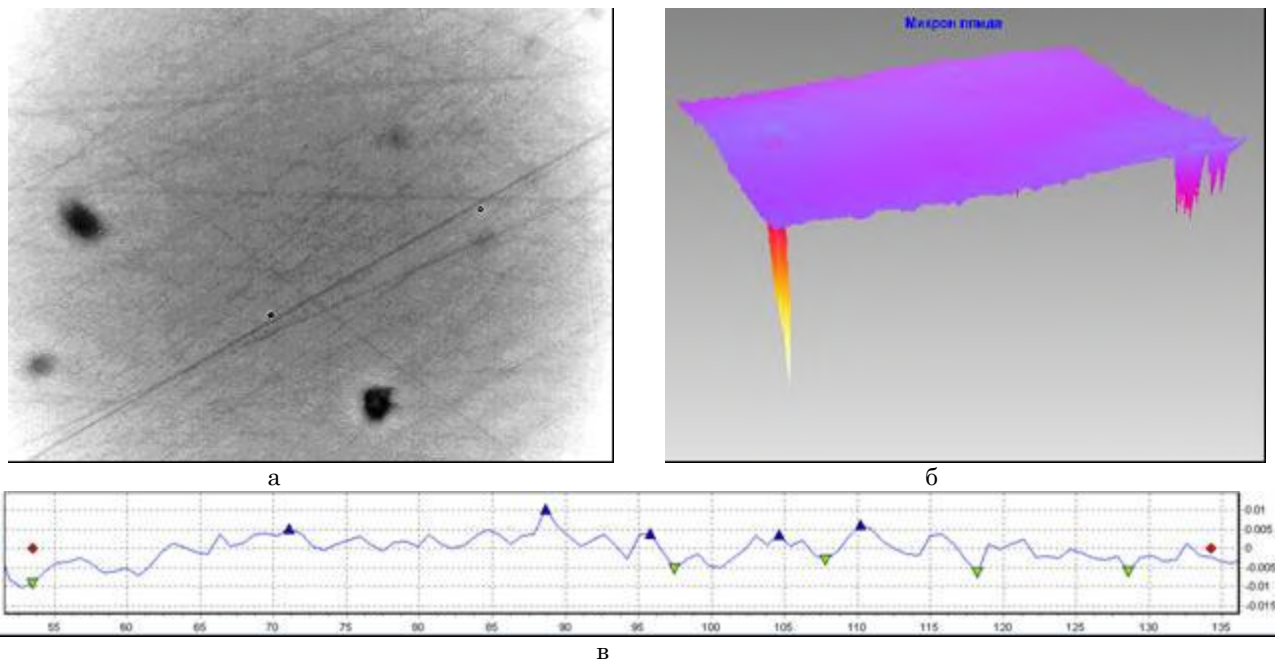


Рисунок 8 – Изображение участка поверхности образца сапфира (а), 3D-картина этого участка поверхности (б), а также профилограмма профиля поверхности вдоль 5-й трассы оценки (в)

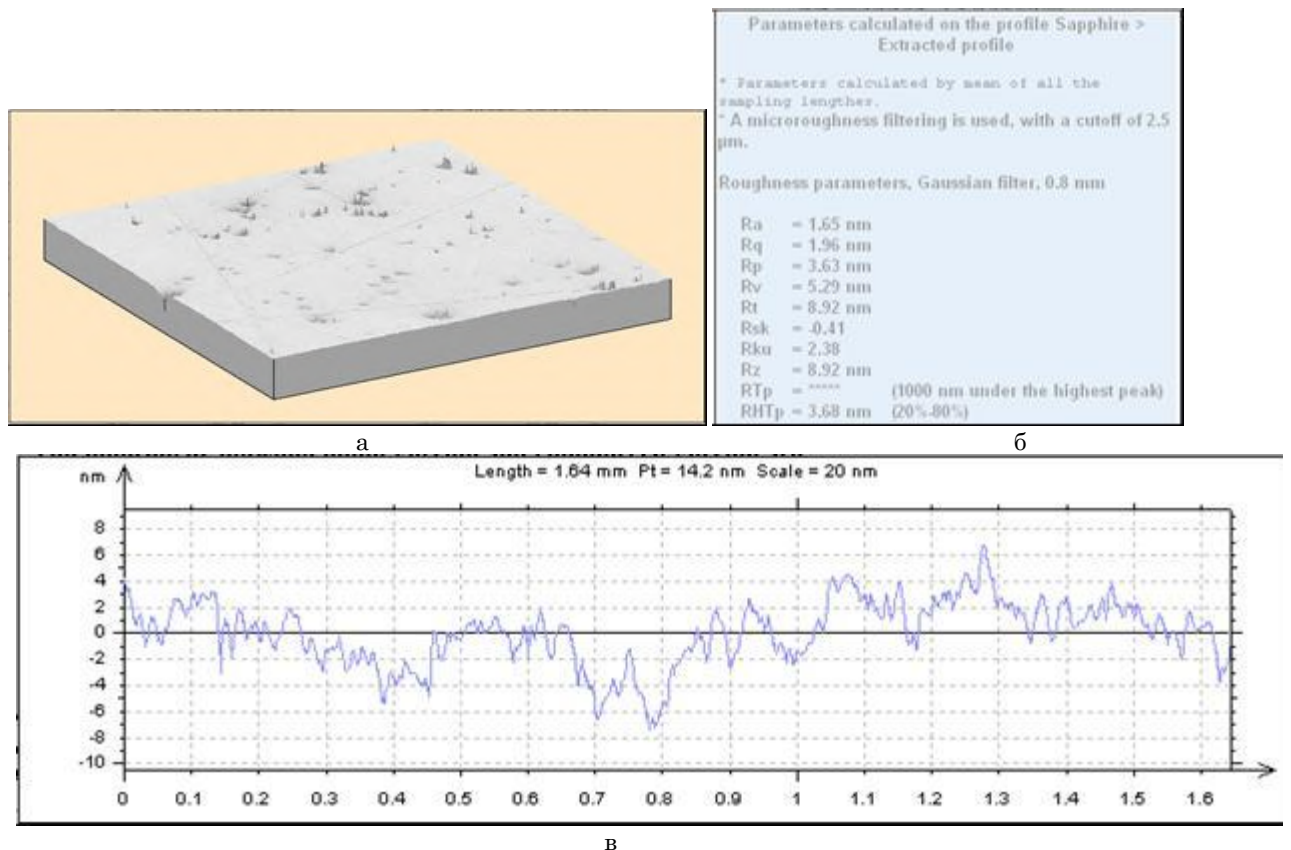


Рисунок 9 – 3D-изображение участка поверхности образца сапфира (а), параметры шероховатости (б) и профилограмма профиля поверхности (в) вдоль 8-й трассы оценки

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из полученных результатов оценки шероховатости поверхности образцов следует, что значения высотных параметров Ra, Rq керамики диоксида циркония и сапфира практически не отличаются (для

обоих материалов разница значений составляет 1 нанометр). Средние значения параметра Rz образца сапфира оказались практически одинаковыми при измерении обоими методами и большими примерно в 3 раза для керамического образца при измерении системой «Talyscan 150». Учитывая большую

склонность сапфира к хрупкому скалыванию при алмазной обработке, это различие свидетельствует скорее о влиянии волнистости поверхности керамического образца.

Примерно во столько же раз отличаются средние значения параметров R_p , R_v и R_t , но на керамике меньшие значения получены при измерении системой «Micron-alpha», а на сапфире – наоборот, системой «Talyscan 150». По-видимому, здесь наблюдается влияние двух факторов: различия в хрупкости материалов и проявления волнистости поверхности с увеличением площади оценивания. При меньшей площади оценивания влияние хрупкости сапфира проявляется более отчетливо. В противном случае у керамического образца более отчетливо наблюдается проявление волнистости.

Судя по средним значениям параметров tr и Rku (практически не отличаются) в случае гладких поверхностей речь идет о нормальном распределении ординат кривой несущей способности обеих поверхностей и степени заостренности неровностей профиля, которые не зависят от метода оценки.

Является очевидной большая чувствительность методики оценки системой «Micron-alpha» к местным дефектам поверхности – выходам пор на поверхность, мелким выколкам, царапинам, обусловленным влиянием физико-механических характеристик материалов, шероховатость поверхности которых оценивается. Это приводит к тому, что свыше трети

результатов измерений могут оказаться исключенными при их статистической обработке. Поэтому для адекватной оценки шероховатости гладких поверхностей, характеризуемых $R_a \leq 0,01$ мкм, при наличии местных дефектов поверхности следует использовать не менее 10 трасс оценки, при этом до трети измерений приходится исключать из рассмотрения из-за влияния указанных дефектов поверхности.

ВЫВОДЫ

Показано, что определение параметров шероховатости гладких поверхностей неметаллов, характеризуемых $R_a \leq 0,01$ мкм, бесконтактной сканирующей измерительной системой «Micron-alpha», использующей микроинтерференционный метод оценки шероховатости на участке поверхности размером 250×190 мкм, позволяет получить результаты, в целом сопоставимые с результатами оценки шероховатости, полученными при сканировании участка поверхности на порядок большего размера. Вместе с тем большая чувствительность такой методики оценки к местным дефектам поверхности – выходам пор на поверхность, мелким выколкам, царапинам требует использовать при измерении не менее 10 трасс оценки.

Evaluation of Smooth Surface Roughness of Nonmetallics by Micro Interference Method

S. Sokhan¹⁾, J. Gawlik²⁾, M. Niemczewska-Wójcik³⁾, D. Iefrosinin⁴⁾, N. Melnik-Kagljak⁵⁾

^{1), 4), 5)} National Academy of Sciences of Ukraine, V. Bakul Institute for Superhard Materials, 2, Avtozavodska St., Kyiv, 04074, Ukraine

^{2), 3)} Cracow University of Technology 'Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki', 24, ul. Warszawska, Krakow, 31-155, Poland

To estimate a roughness of the surfaces characterized by $R_a \leq 0,01$ μm is possible by measuring system «Micron-alpha» on the basis of the optical device MII-4. The device for digital fixing of the MII-4 scans a surface area in the size no more 250×190 μm . However in this case from regulated by standard ISO of size of sampling length (0,08 mm) and a parity of sampling length and evaluation length (0,08/0,4) the second is not carried out. The article shows that values of surface roughness parameters of such materials as sapphire and zirconium dioxide ceramics calculated by the mentioned measuring system are comparable to results of an evaluation of the roughness, worked out at scanning of surface area of 10 times bigger size. At the same time more high sensitivity of such estimating technique to local defects of a surface such as appearance of a pores on a surface, small chips or scratches, requires to use in measuring not less than 10 evaluation tracks.

Keywords: surface roughness of sapphire, zirconium dioxide ceramics, micro interferential method of evaluation, scanning measuring system on the basis of the optical device MII-4, roughness parameters.

Оцінювання шорсткості гладких поверхонь неметалів мікроінтерференційним методом

С. В. Сохань¹⁾, Й. Гавлик²⁾, М. Нимчевска-Войцек³⁾, Д. В. Ефросинин⁴⁾, Н. А. Мельник-Кагляк⁵⁾

^{1), 4), 5)} Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, вул. Автозаводська, 2, м. Київ, Україна, 04074

^{2), 3)} Краківський технічний університет «Політехніка Краківська», м. Краків, Польща

Оцінювання шорсткості поверхонь, що характеризуються $R_a \leq 0,01$ мкм, може бути виконане вимірною системою «Micron-alpha» на базі оптичного приладу МІІ-4. Пристрій цифрової фіксації останнього дозволяє сканувати ділянку поверхні розміром не більше 250×190 мкм. Однак у

цьому випадку з регламентованих стандартом ISO величини базової довжини (0,08 мм), співвідношення базової довжини і довжини оцінювання (0,08/0,4) останнє не виконується. У статті показано, що значення параметрів шорсткості поверхні таких матеріалів, як сапфір і кераміка, на основі діоксиду цирконію, що визначені названою вимірювальною системою, є зіставними з результатами оцінювання шорсткості, одержаними при скануванні ділянки поверхні на порядок більшого розміру. Разом з тим більша чутливість такої методики оцінювання до місцевих дефектів поверхні – виходом пор на поверхню, дрібним відколкам, подряпинам вимагає використовувати при вимірюванні не менше 10 трас оцінювання.

Ключові слова: шорсткість поверхні сапфіру, кераміки на основі діоксиду цирконію, мікроінтерференційний метод оцінювання, сканувальна вимірювальна система на базі оптичного приладу МІІІ-4, параметри шорсткості.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гибкая шлифовальная обработка в медицинской технике // Металлообработка и станкостроение. – 2011. – № 10. – С. 30 - 32.
2. Whitehouse D. J. 2011. Handbook of Surface and Nanometrology, New York: CRC Press, Taylor & Francis.
3. Yang C. 2008. Role of Surface Roughness in Tribology: From Atomic to Macroscopic Scale. Berlin: GmbH.
4. Whitehouse D. J. 1982. The parameter rash – is there a cure? Wear 83(1): 75 - 78.
5. Deltombe R., Kubiak K.J., Bigerelle M, How to select the most relevant 3D roughness parameters of a surface (2011), Scanning. doi: 10.1002/sca.21113, which has been published in final form at <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/sca.21113/abstract>
6. Эндопротезы суставов человека: материалы и технологии : Монография / под ред. Н. В. Новикова, О. А. Розенберга, Й. Гавлика.– Киев : ИСМ НАН Украины, 2011. – 528 с.
7. ГОСТ 25142-82 Шероховатость поверхности. Термины и определения.
8. ISO 4287:1997/Cor.1:1998 Geometrical product specifications (GPS). Surface texture. Profile method. Terms, definitions and surface texture parameters.
9. ДСТУ ISO 12085-2001 Технічні вимоги до геометрії виробів (GPS). Структура поверхні. Профільний метод. Параметри структурних елементів (ISO 12085:1996, IDT).
10. ISO 4288:1996 Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Rules and procedures for the assessment of surface texture.
11. Gawlik J., Niemczewska-Wojcik M., Krajewska J., Sokhan S.V., Paschenko E.A., Zuk T.S. The influence of tool composite's structure during process of diamond grinding of ceramic materials / Management and Production Engineering Review. – 2014. – V. 5, No. 4. – P. 9 - 17.

REFERENCES

1. Gibkaya shlifovalnaya obrabotka v meditsinskoj tehnike / Metalloobrabotka i stankostroenie 2011 No.10 pp. 30 - 32.
2. Whitehouse D. J. 2011. Handbook of Surface and Nanometrology, New York: CRC Press, Taylor & Francis.
3. Yang C. 2008. Role of Surface Roughness in Tribology: From Atomic to Macroscopic Scale. Berlin: GmbH.
4. Whitehouse D. J. 1982. The parameter rash – is there a cure? Wear 83(1): 75 - 78.
5. Deltombe R., Kubiak K.J., Bigerelle M, How to select the most relevant 3D roughness parameters of a surface (2011), Scanning. doi: 10.1002/sca.21113, which has been published in final form at <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/sca.21113/abstract>
6. Endoprotezy sustavov cheloveka: materialy i tehnologii / Monograph / Pod red. N.V. Novikova, O.A. Rozenberga, J. Gawlika. – Kiev: ISM NAN Ukraine, 2011. – pp. 528.
7. GOST 25142-82 Sherohovatost' poverhnosti. Terminy i opredeleniya.
8. ISO 4287:1997/Cor.1:1998 Geometrical product specifications (GPS). Surface texture. Profile method. Terms, definitions and surface texture parameters.
9. DSTU ISO 12085-2001 Tehnichni vymohy do geometrii vyrobiv (GPS). Struktura poverhni. Profilny metod. Parametry strukturnyh elementiv (ISO 12085:1996, IDT).
10. ISO 4288:1996 Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Rules and procedures for the assessment of surface texture.
11. Gawlik J., Niemczewska-Wojcik M., Krajewska J., Sokhan S.V., Paschenko E.A., Zuk T.S. The influence of tool composite's structure during process of diamond grinding of ceramic materials / Management and Production Engineering Review 2014 V.5 No.4 pp. 9 - 17.



Шановні автори нашого журналу!

Редакційна колегія «Журналу інженерних наук» при відборі статей надає особливу увагу їх структурі (відповідно Постанови Президіуму ВАК України «Про підвищення вимог до фахових видань, внесених до переліків ВАК України» от 15.01.2003 г. № 7-05/1). До публікації приймаються оригінальні статті в електронному вигляді одного чи кількох авторів (до 5 чоловік включно) відповідно до головних рубрик «Журналу інженерних наук».

Наукові статті повинні містити такі елементи:

- постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими та практичними завданнями
- аналіз останніх досліджень та публікацій, в яких закладено початок вирішенню даної проблеми на які спирається автор
- виокремлення раніше не вирішених складових загальної проблеми, яким присвячена стаття
- формулювання цілей статті(постановка задачі)
- викладення основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів
- висновки стосовно даного дослідження і перспективи подальших розробок у заданому напрямку.

Всі статті проходять незалежну закриту рецензію.

Для публікації в науковому журналі авторам в електронному вигляді через веб – сервіс сайту необхідно надати наступні документи:

- Стаття (російською, українською чи англійською 100-200 слів).
- Розширену анотацію англійською мовою (100-200 слів)

Увага! За відсутності одного з вказаних компонентів, наявності великої кількості стилістичних, орфографічних та граматичних помилок, а також при оформленні не за правилами, матеріали не приймаються до розгляду редколегією та не рецензуються.

Мінімальний об'єм матеріалів:

Науково теоретичні – статті(до 25 000 символів близько 14 стор.) – Присвячені теоретичному пошукові і поясненню закономірності явищ, що вивчаються. Теоретичні статті є базою для проведення будь –якого дослідження. Часто шляхом лише теоретичних міркувань відкривались фундаментальні закони, котрі пізніше підтверджувались дослідями та експериментами. Є галузі, де лише теоретичні методи дозволяють розкрити сутність об'єкта, що цікавить.

Науково – практичні статті (до 10 000 символів, близько 6 стор.) присвячені науковим експериментам та реальному досвіду В них описуються методи проведення експериментів або засоби спостереження і фіксації певних явищ. Обов'язковою частиною такої статті є викладення результатів та їх пояснення, отримане у процесі безпосереднього дотикання та дії на об'єкт дослідження.

Науково – методичні статті (до 15 000 символів, близько 8 стор.)–присвячені огляду процесів, методів, інструментів, що дозволяють домогтися наукових або прикладних задач. Часто формуванню нової методики передують повноцінна наукова робота. Результати якої дозволяють створити більш тону методику на основі заново виявлених закономірностей. Тому нерідко тематики дисертацій присвячені розробці методики(механізму, інструментарію і т. п.). Подібні статті в подальшому кладуться в основу довідників.

Электрическое моделирование рабочих процессов в электромеханических системах сетей водоснабжения

В. С. Бойко¹⁾, Н. И. Сотник²⁾

¹⁾ НТУУ «Киевский политехнический институт» просп. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056

²⁾ Сумский государственный университет, ул. Римского-Корсакова, 2, Сумы, Украина, 40007

Article info:

Paper received:

30 November 2015

The final version of the paper received:

06 December 2015

Paper accepted online:

10 December 2015

Correspondent Author's Address:

¹⁾ VSBoiko@bigmir.net

²⁾ ni.sotnik@gmail.com

В статье приведены результаты исследований, направленные на развитие научного направления, предусматривающего проведение анализа энергетических процессов в электромеханических системах сетей водоснабжения с использованием электрических методов моделирования их рабочих процессов. В качестве электромеханической системы рассматривается совокупность энергетических компонент сети водоснабжения: приводной электрический двигатель, передающие механизмы, насос и система подвода жидкости к насосу. Основной составной частью электрической модели электромеханической системы является преобразователь электрической энергии - выпрямитель. В моделях электромеханических систем, содержащих поршневые насосы, используются известные в энергетической электронике схемы однофазного и трехфазного выпрямления. Для реализации электрических моделей электромеханических систем, содержащих центробежные насосы, авторами разработаны схемы преобразователей электрической энергии, которые в зависимости от сложности схемотехнической реализации и особенностей электромагнитных процессов разделены на три уровня. Разработана методика анализа электромагнитных процессов в таких моделях и доказана адекватность результатов электрического моделирования реально существующим рабочим процессам в моделируемых сетях водоснабжения.

Ключевые слова: насос, схема замещения, энергия, энергоэффективность, выпрямитель.

ВВЕДЕНИЕ

При работе насосов вне рабочего диапазона их Q-H-характеристики имеет место дополнительная потеря энергии, обусловленная особенностями рабочего процесса на таких режимах. В таких случаях высокий паспортный КПД насоса нивелируется дополнительными потерями энергии, вызываемыми несогласованностью между подачей насосного агрегата и мгновенной потребностью сети.

Эксплуатация насосных агрегатов в системах, имеющих переменное гидравлическое сопротивление по ступенчатому графику, также сопровождается дополнительными потерями энергии из-за несогласованности гидравлических параметров насоса с переменными гидравлическими параметрами сети.

Простейший (с технической точки зрения) способ решения указанных проблем заключается в замене насосного агрегата. Однако, учитывая особенности эксплуатации насосов, касающиеся времени продолжительности работы насоса за определенный период, частоты включений агрегата, диапазона изменения параметров сети такое решение может оказаться экономически необоснованным.

Основной составляющей конструкции насоса являются его корпусные детали со сроком службы до

30 лет. Учитывая их материалоемкость, они составляют значительную часть общей стоимости насоса. Поэтому предпочтительнее осуществить замену элементов проточной части насоса путем модернизации выходной части лопасти рабочего колеса, которая рассчитывается на новый режим работы.

Использование для исследования режимов рабочего процесса насосного агрегата его электрической модели дополняет традиционные методы анализа и позволяет использовать принципы гидроэлектрической аналогии при исследовании взаимосвязи насосного агрегата с гидравлической сетью.

АНАЛИЗ ПРЕДЫДУЩИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Попытки привлечения различных методов моделирования к анализу рабочих процессов в сетях водоснабжения и их элементах имеют давнюю (почти столетнюю) историю. Так, еще в 1922 году академик Н. Н. Павловский разработал и использовал в практических целях метод электрогидродинамических аналогий при исследовании ламинарного движения грунтовых вод в процессе их фильтрации через земляные плотины. Впоследствии эти методы анализа получили дальнейшее развитие в работах Г. О. Рязанова [1]. Однако широкого распространения они так и не получили из-за затратности, слож-

ности и необходимости создания физических моделей. Кроме того, методы не предусматривают возможности моделирования насосных агрегатов.

Гораздо большее распространение получил метод электрогидравлической аналогии. До недавнего времени он являлся распространенным аппаратом математического моделирования и расчета гидравлических и энергетических процессов в сетях водоснабжения. Основные принципы и аналогии такого моделирования рассмотрены в работах Е. П. Григоровского, И. М. Вершинина, Б. Ф. Гликмана, Г. Ф. Проскуры, В. С. Костышина и др.

Сущность метода электрогидравлических аналогий можно понять, анализируя работы Б. Ф. Гликмана [2, 3]. Им показана перспективность использования матричных методов, поскольку уравнения гидравлической системы, составленные этими методами, компактны и весьма просты для выполнения расчетов, в том числе и с использованием вычислительной техники. Согласно подходу Б. Ф. Гликмана любую систему водоснабжения можно представить совокупностью двух-, четырех- и шестиполусных элементов. Пример гидравлической системы и ее электрической схемы замещения приведен на рис. 1.

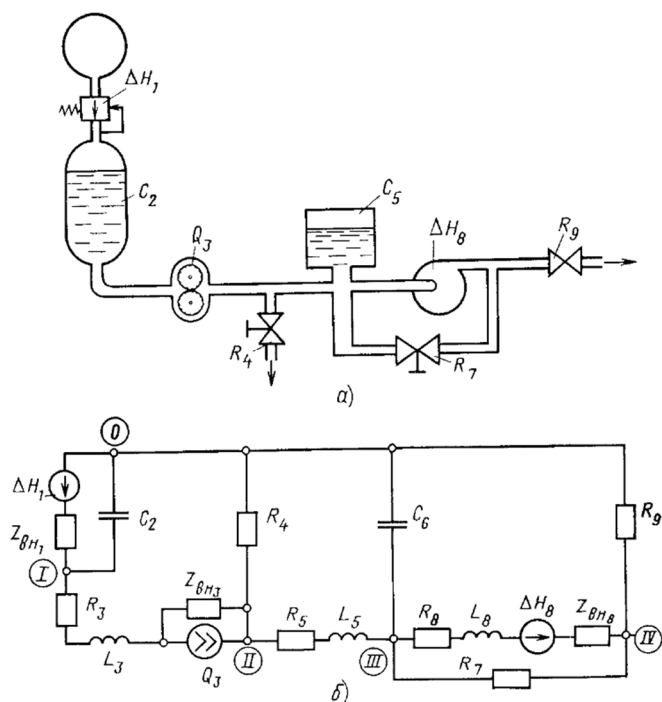


Рисунок 1 - Гидравлическая система а) и ее электрическая схема замещения б)

Расчет такой цепи можно выполнить методом контурных расходов или методом узловых напоров, которые являются аналогами методов контурных токов и узловых напряжений, используемых при расчетах сложных электрических цепей.

Суть научного подхода Б. Ф. Гликмана относительно источников энергии схемы состоит в том, что их характеристики являются Q - H -характеристиками

насосов, а основные расчетные переменные - напор и расход.

Недостатком теоретических положений, предлагаемых Б. Ф. Гликманом и другими последователями метода электрогидравлических аналогий, является отсутствие анализа рабочего процесса в насосе и представления его адекватной схемой замещения. Если же рассматривать насос как источник постоянного расхода (аналог источника тока в электрической цепи) или источник постоянного напора (аналог источника ЭДС в электрической цепи), то схема замещения б) на рис.1 должна быть иной, т. е. она не может считаться адекватной схеме а) рис. 1. При анализе ее в установившемся режиме индуктивные элементы должны иметь нулевое сопротивление, а емкостные - бесконечно большое.

Исследования в части моделирования режимов работы центробежных насосов на основе электрогидравлической аналогии проведены В. С. Костышиным. Им предложена полная комплексная схема замещения центробежного насоса, приведенная на рис. 2. Как и в работах Б. Ф. Гликмана, схема электрическая. Она содержит пассивные двухполусные элементы цепи электрического тока и один синусоидальный источник энергии, который является источником напора с расходом Q_2 , а основные расчетные переменные - напор и расход. Таким образом, работы В.С. Костышина также базируются на принципах электрогидравлического моделирования.

Их суть сформулирована В. С. Костышиным в его монографии [4]. Цитируем по тексту: «Применение электрогидравлической аналогии базируется на систематическом переносе теории электрических цепей в гидравлику. При этом основные электрические уравнения переходят в соответствующие гидравлические соотношения, которые всегда выполняются и на основании которых можно составлять гидравлические схемы и анализировать их теми же хорошо развитыми методами, что и электрические цепи».

Другими словами, используя аналогию между основными характеристиками гидравлических систем и электрических цепей, составляется электрическая схема замещения, анализ которой можно осуществить методами электрических цепей, но используются при этом основные ха-

рактеристики гидравлической системы. Блок-схема такого подхода представлена на рис. 3.

Проведенные В. С. Костышиным исследования по созданию электрогидравлической модели центробежного насоса нельзя считать законченными, поскольку приведенная на рис. 2 электрогидравлическая модель неработоспособна, так как в ней не решена проблема моделирования движения жидкости в отводе.

По нашему мнению, на сегодняшний день в этом уже и нет особой необходимости, так как проблема электрогидравлического моделирования в сетях водоснабжения существенно потеряла свою актуаль-

ность. Эта проблема была актуальна лет 20 - 30 назад. Об этом пишет и В. С. Костышин в своей мо-

нографии [4], ссылаясь на работы И. М. Вершинина.

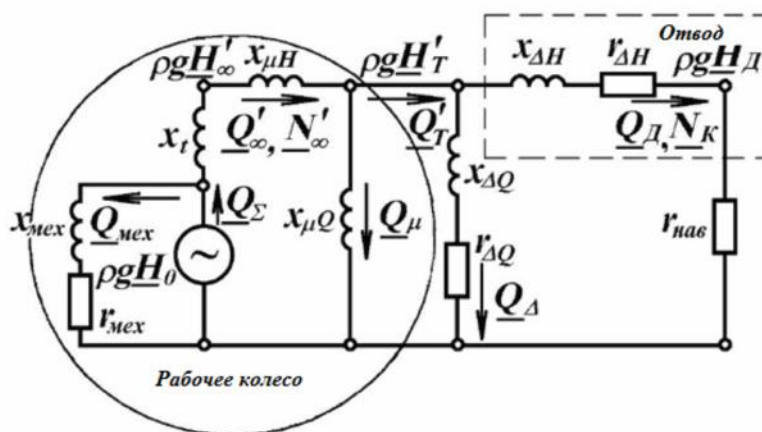


Рисунок 2 - Полная комплексная схема замещения центробежного насоса



Рисунок 3 - Принцип электрогидравлического моделирования

Цитируем по тексту: «Гидромеханика лопастных машин, по словам Вершинина, утонула в эмпирических стохастических формулах, которые не допускают эффективного использования ЭВМ, так как не отвечают реальным конструкциям машин. Кроме того, они не позволяют установить все закономерности взаимосвязанных физических процессов, которые имеют место в лопастных гидромашинах. Это в значительной степени усложняет решение оптимизационных задач проектирования ЦН и повышения эффективности их функционирования. Особенно остро отставание теории гидромеханики лопастных гидромашин на фоне развития теории электрических машин, где формализация задач выполнена на значительно высшем уровне». Изложенное показывает, что электрогидравлическое моделирование занимает нишу между чисто гидравлическим моделированием и чисто электрическим. Однако в настоящее время уже нет того отставания возможностей гидравлической науки от электротехнической, которое было лет 20 - 30 назад.

Развитие вычислительной техники открыло новые возможности в исследовании процессов гидродинамики, которые имеют место в составной части электронасосного агрегата - насосе. Современные возможности компьютеров позволили применить новый метод исследования рабочего процесса - числовой эксперимент, который базируется на учете физической сущности явлений, которые рассматри-

ваются. Числовой эксперимент как метод исследования основан на математическом моделировании, т. е. на исследовании математических моделей для изучения объектов или процессов с помощью средств вычислительной техники. Используя указанный метод исследований, можно получить информацию об основных характеристиках рабочего режима. Например, на изображении а) рис. 4 приведена физическая картина распределения абсолютной скорости жидкости в проточной части насоса, а на изображении б) рис. 4 - та же информация, но уже в векторном виде.

Использование числового эксперимента позволяет также моделировать и нестандартные ситуации, возникающие в проточных частях насосов, например, результаты влияния длительно существовавшего кавитационного явления.

Естественно, что при развитии чисто гидравлических методов анализа рабочих процессов в насосах снижается интерес к методам электрогидравлического моделирования.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изложить суть чисто электрического моделирования рабочих процессов в электромеханических системах (ЭМС) сетей водоснабжения, доказать адекватность результатов электрического моделирования рабочих процессов в ЭМС с центробежными и поршневыми насосами.

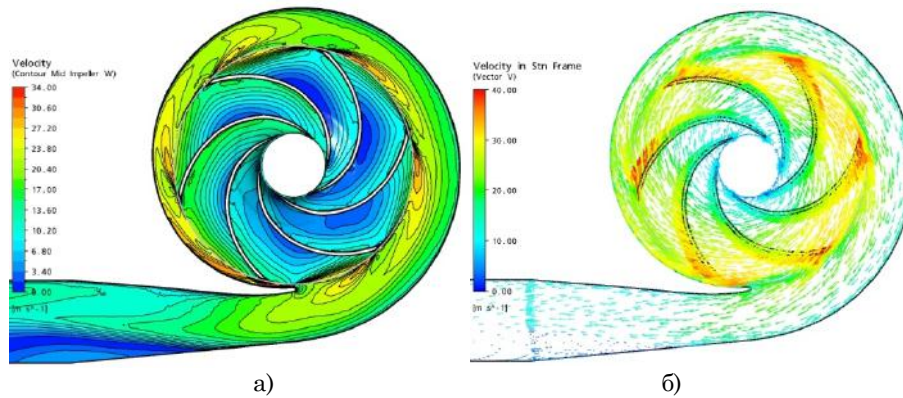


Рисунок 4 - Распределение абсолютной скорости жидкости в проточной части насоса

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Чем электрическое моделирование отличается от электрогидравлического и в чем суть предлагаемых чисто электрических методов анализа рабочих процессов?

Электрическое моделирование основано на подобию явлений в гидроэлектромеханических и электротехнических системах, использует аналогию между основными характеристиками рабочих процессов в элементах гидравлических систем и основными характеристиками электромагнитных процессов в их электрических моделях, схмотехническое построение которых базируется на схемах преобразователей электрической энергии, а анализ процессов осуществляется электротехническими методами. Блок-схема такого подхода представлена на рис. 5.

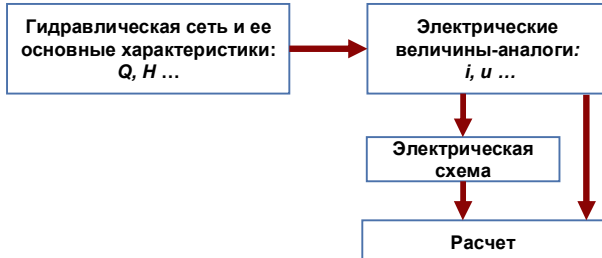


Рисунок 5 - Принцип электрического моделирования

Другими словами, используя аналогию между основными характеристиками гидравлических систем и электрических цепей, составляется электрическая схема замещения, анализ которой осуществляется методами электрических цепей, используя при этом основные электротехнические величины.

Вышеизложенное касается как отдельных элементов гидравлических сетей, так и гидравлических сетей в целом. Электрическое моделирование пассивных элементов гидросети (участков водоводов, поворотов, задвижек и др.) общеизвестно. Более важной является проблема электрического моделирования насосных агрегатов.

Проведенные в этом направлении исследования показали, что моделировать следует не насос и не насосный агрегат, а целиком электромеханическую систему (ЭМС), состоящую из приводного электрического двигателя, передающих механизмов, насоса и системы подвода жидкости к насосу. В таком случае

анализ рабочих процессов является комплексным как в физическом, так и в энергетическом аспекте, что важно для достижения максимально возможной высокой энергоэффективности функционирования системы.

Электрическое моделирование ЭМС осуществляется на основе следующих рассуждений. Электрическая энергия, потребляемая приводным электродвигателем из электрической сети, преобразуется в гидравлическую энергию потока жидкости, проходящую через насос. Приращение энергии в рабочем колесе последнего зависит от скорости потока, числа оборотов рабочего колеса, его геометрических размеров и формы лопастей. В отводных каналах корпуса и диффузоре кинетическая энергия жидкости частично превращается в энергию давления.

Жидкость, получившая ускорение в проточной части рабочего колеса насоса, через диффузор попадает во внешнюю трубопроводную систему и поступает к потребителю. То есть имеют место два процесса: "разгон" жидкости лопастями рабочего колеса и "выталкивание" ее во внешнюю трубопроводную систему.

Отводная камера насосов типа Д, для которых разрабатываются теоретические основы их электрического моделирования, может иметь более простую конструкцию (с однозавитковым спиральным отводом) или более сложную - с двухзавитковым спиральным отводом.

В насосах с однозавитковым спиральным отводом каждая лопасть за один оборот рабочего колеса один раз проходит мимо начала отвода (язык) и перемещает жидкость в отводную камеру через диффузор к напорному трубопроводу, поэтому количество таких "выталкиваний" (относительно языка) за один оборот рабочего колеса соответствует количеству его лопастей. В насосах с двухзавитковым спиральным отводом описанный процесс удваивается.

Предположим, что в состав электромеханической системы входит центробежный насос двухстороннего входа жидкости с однозавитковым спиральным отводом, рабочее колесо которого имеет три лопасти. Упрощенная схема движения жидкости в насосе представлена на рис. 6, а электрическая схема такой электромеханической системы - на рис. 7.

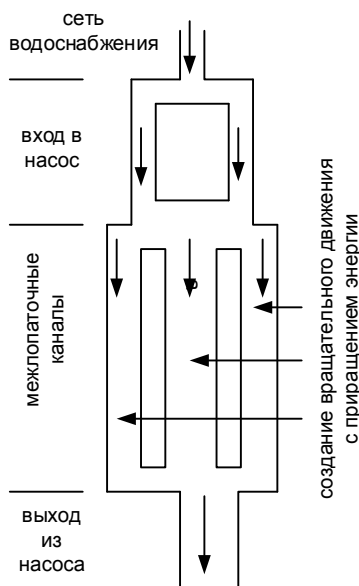


Рисунок 6 - Упрощенная схема движения жидкости в насосе

Жидкость, поступающая из сети водоснабжения, на входе насоса разделяется на два симметричных потока. Далее эти потоки распределяются по межлопастным каналам рабочего колеса, где осуществляются два энергетических превращения: поток жидкости приобретает вращательное движение с одновременным приращением энергии. Далее при выходе из проточной части насоса движение жидкости становится односторонне направленным. То есть место начала «языка» является своеобразным местом начала процесса превращения вращательного движения жидкости в однонаправленное. Описанному соответствует изображенная на рис. 7 схема электрической модели электромеханической системы.

Схема трехфазная. Каждая фаза состоит из последовательно соединенных: источника синусоидальной ЭДС, индуктивности L_{Γ} , активного сопротивления R и диода D . Наличие подпора по всасу моделируется наличием источника постоянной ЭДС E_{Π} .

Обратим внимание, что совокупность источников ЭДС $e_j = E_m \sin(\omega t + \psi_j)$ моделирует не приводной электрический двигатель электромеханической системы, а его наличие и влияние на физический и энергетический процесс в ЭМС. При этом учитываются как конструктивные особенности электродвигателя и некоторые его рабочие характеристики, так и некоторые конструктивные особенности насоса.

В общем случае для электрической модели ЭМС с центробежным насосом, имеющим однозавитковый спиральный отвод, рабочее колесо которого имеет K_{Γ} лопастей, система ЭДС параллельных ветвей модели запишется в виде гармонической функции (синусоиды) следующим образом:

$$e_j = E_m \sin \left[\omega t + \pi \left(0,5 + \frac{1-2j}{m} \right) \right],$$

где j - номер ветви электрической модели.

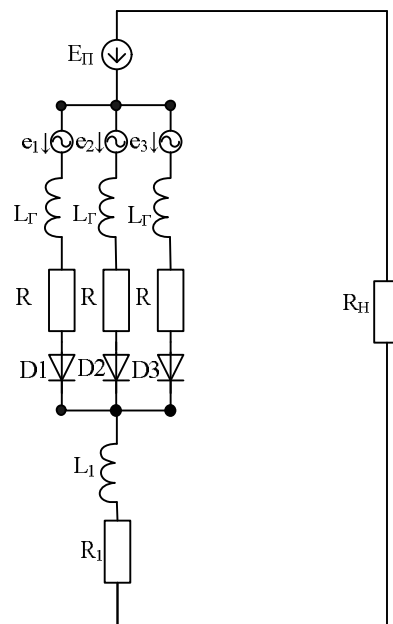


Рисунок 7 - Схема электрической модели ЭМС ($m = 3$)

Все изложенное выше относительно моделирования электромеханических систем с центробежными насосами применимо и к ЭМС с поршневыми насосами.

В публикации [5], подготовленной EuroPump и Гидравлическим институтом США, в разделе, посвященном исследованию процессов в поршневых насосах, приведен рисунок, на котором показано перемещение плунжера при вращении коленчатого вала (рис. 8). Там же отмечается, что поток наблюдается от 0 градусов - нижней мертвой точки - до 180 градусов - верхней мертвой точки. Площадь под кривой показывает полный вытесненный объем. Ось Y также показывает, как изменяется расход, цилиндр наполняется, но нагнетаемая часть потока отсутствует. Производительность представляет собой ряд синусоидальных максимумов.

Далее авторы указывают, что на практике будет наблюдаться кратковременное запаздывание начала «максимума», так как выбирается зазор между шатуном и коленчатым валом; также будет наблюдаться задержка открытия нагнетательного клапана, поскольку давление в цилиндре повышается, и преодолевается инерция клапана. Аналогичный результат будет получен в конце «максимума», поскольку механический зазор устраняется, создается перепад давления на всасывающем клапане и преодолевается инерция всасывающего клапана.

Подача Q зависит от времени $Q(t)$ и повышается от 0 % до 315 % средней подачи за четверть оборота. Еще через четверть оборота перекачивание продолжается, но подача снижается от 315 % средней величины до 0.

Во второй половине оборота перекачивание отсутствует, так как в это время цилиндр наполняется. Как правило, давление также меняется во времени, так как подача неравномерна.

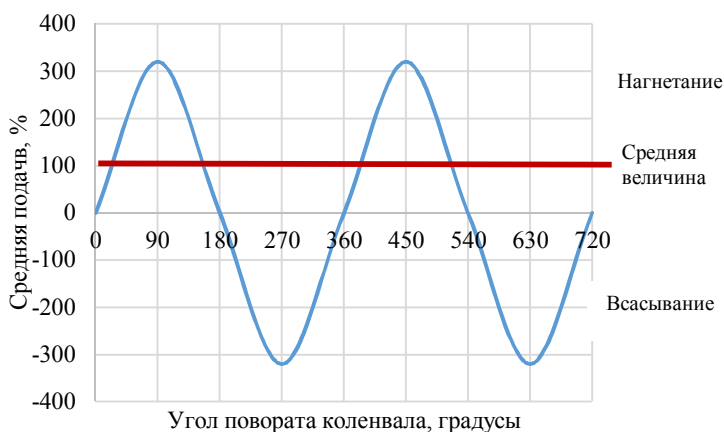


Рисунок 8 - Изменение производительности симплекс-насоса

Схема электрической модели поршневого насоса приведена на рис. 9. Это схема однофазного однополупериодного выпрямителя. Характер электромагнитного процесса в ней зависит от наличия и величины сопротивлений как в цепи переменного тока (R_e, L_e), так и в цепи нагрузки (R_d, C).

Проанализируем электромагнитный процесс в выпрямителе, реализованном по схеме рис. 9, в зависимости от параметров элементов цепи переменного тока при чисто активной нагрузке R_d .

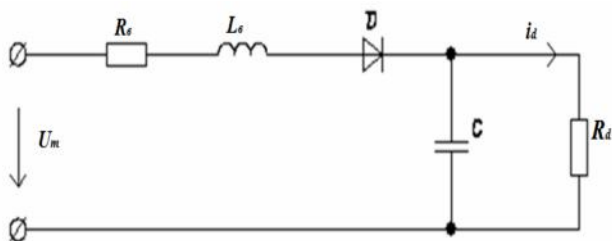


Рисунок 9 - Схема электрической модели поршневого насоса

В исследуемой цепи действует источник переменного синусоидального напряжения $u = U_m \sin \omega t$. В ту часть периода, когда к диоду приложено напряжение в прямом направлении (от анода к катоду), он будет открыт, и в цепи будет проходить электрический ток i_d , относительно которого все элементы цепи будут включены последовательно. Если ввести при этом обозначения ($R = R_e + R_d, x = \omega L_e$), уравнение цепи в интервале проводимости диода запишем в следующем виде:

$$u - x \frac{di_d}{d\vartheta} = i_d R.$$

Решение этого уравнения, как и подробный анализ рассматриваемого режима работы однофазного однополупериодного выпрямителя, приведен в [6]. Выражение закономерности изменения выпрямленного тока имеет вид

$$i_d = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + x^2}} [\sin(\vartheta - \varphi) + \sin \varphi \cdot e^{-\frac{R}{x} \vartheta}], \quad (1)$$

где $\vartheta = \omega t, \varphi = \arctg(x/R)$ - угол сдвига фаз между напряжением и первой гармоникой тока.

Если в выражении (1) принять, что $x = 0$, получим $i_d = U_m / R$, т. е. одинаковую форму напряжения источника и выпрямленного тока (как на рис. 8).

Если по выражению (1) построить кривую выпрямленного тока, она не совпадет по форме с кривой напряжения источника, что объясняется наличием активного и индуктивного сопротивлений в цепи переменного тока. Это физическое явление несовпадения форм кривых тока и напряжения выше называется запаздыванием синусоидальных «максимумов».

На рисунке 10 изображена схема электрической модели симплекс-насоса, а на рисунке 11 приведены кривые тока и напряжения однополупериодного выпрямителя, полученные при моделировании рассматриваемого режима в системе схемотехнического моделирования с использованием схемы рис. 10.

Далее проанализируем электромагнитный процесс в выпрямителе, реализованном по схеме рис. 9, в зависимости от параметров элементов цепи нагрузки. При этом параметрами элементов цепи переменного тока пренебрегаем.

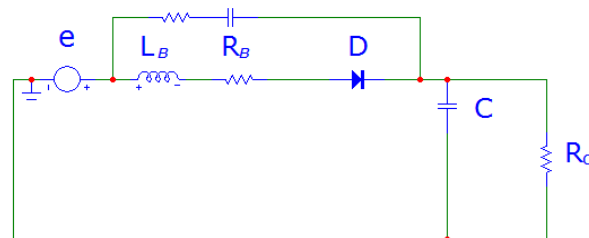


Рисунок 10 - Схема электрической модели симплекс-насоса

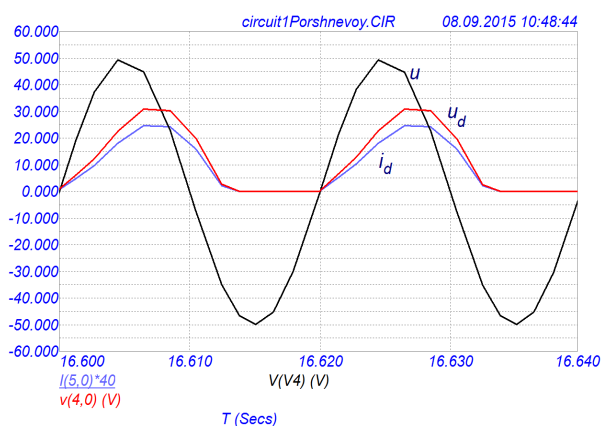


Рисунок 11 - Результат схемотехнического моделирования одного из режимов работы однофазного однополупериодного выпрямителя

Как и при предыдущем исследовании, будем считать, что в цепи действует источник переменного синусоидального напряжения $u = U_m \sin \omega t$. В ту часть периода, когда к диоду приложено напряжение в прямом направлении (от анода к катоду), он будет открыт, и в цепи будет проходить электрический ток. Соответственно обозначим момент вступ-

ления вентиля в работу через t_1 , а момент выхода из работы – t_2 .

Если пренебречь сопротивлением диода в прямом направлении, то в интервале времени между t_1 и t_2 к емкости и сопротивлению нагрузки будет приложено напряжение сети. Поэтому токи отдельных ветвей схемы запишем в следующем виде:

$$i_C = Cduc/dt = \omega CU_m \cos \omega t;$$

$$i_R = \frac{U_m}{R} \sin \omega t;$$

$$i_d = i_C + i_R = \omega CU_m \cos \omega t + \frac{U_m}{R} \sin \omega t.$$

В момент времени t_2 диод закрывается и выпрямленный ток $i_d = 0$:

$$\omega CU_m \cos \omega t + \frac{U_m}{R} \sin \omega t = 0.$$

Сократив последнее на U_m , получим соотношение для расчета момента выхода вентиля из работы:

$$\omega t_2 = -\arctg \omega RC. \quad (2)$$

После закрытия вентиля начинается переходной процесс разряда емкости через сопротивление R . Это известный в электротехнике электромагнитный процесс, поэтому приводить подробности его расчета нет необходимости. Отметим, что в интервале от момента выхода диода с работы (t_2) и до момента его повторного вступления в работу (t_3) напряжение на емкости и напряжение на нагрузке будут изменяться в соответствии с соотношением

$$u_C = u_R = U_m \sin \omega t_2 \cdot e^{-(t-t_2)/RC}. \quad (3)$$

Диод вступает в работу один раз за период (T), поэтому $t_3 = t_1 + T$. Используя соотношение (3) и то, что в момент вступления вентиля в работу напряжение на емкости равно сетевому напряжению, запишем

$$U_m \sin \omega t_1 = U_m \sin \omega t_2 \cdot e^{-(t_1+T-t_2)/RC}. \quad (4)$$

Сократив последнее на U_m , получим соотношение для расчета момента вступления вентиля в работу

$$\sin \omega t_1 \cdot e^{(t_1+T)/RC} = \sin \omega t_2 \cdot e^{t_2/RC}. \quad (5)$$

Если пренебречь наличием емкости в цепи нагрузки ($C = 0$), тогда из выражения (2) получим, что вентиль закрывается в момент окончания первого полупериода ($\omega t_2 = 180^\circ$), а в соответствии с (4), вступает в работу при $\omega t_1 = 0^\circ$, т. е. кривая выпрямленного тока имеет одинаковую форму с кривой напряжения источника. Если наличием емкости не пренебрегать, тогда картина электромагнитного процесса будет иной. Ее иллюстрируют изображения а) и б) рис. 12, полученные при различном значении емкости в цепи нагрузки электрической модели.

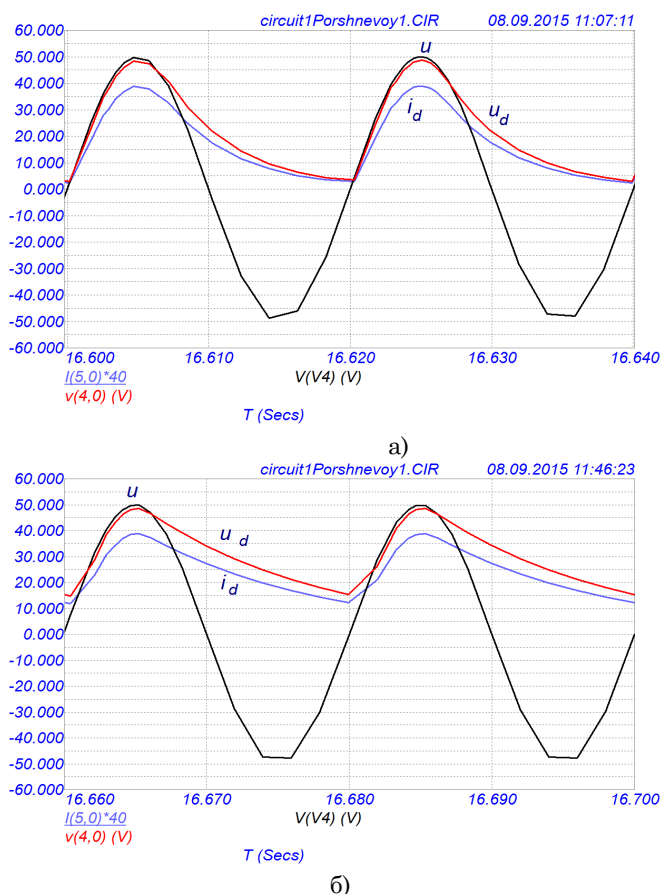


Рисунок 12 - Результаты схемотехнического моделирования при различном значении емкости в цепи

Как отмечается в [5], двухцилиндровый поршневой насос (или дуплекс-насос) имеет второй дополнительный комплект частей: шатун, плунжерный шток, плунжер и уплотнения, узлы всасывающих и нагнетательных клапанов. Второй плунжер смещен на 180° по фазе от первого. Таким образом, это усовершенствование по сравнению с симплекс-насосом, тем не менее наблюдается большое колебание подачи и, следовательно, крутящего момента (см. рис. 13). Пульсация подачи все же имеет место от 0, но достигает только 157 % средней величины. Частота удвоенная по сравнению с симплекс-насосом.

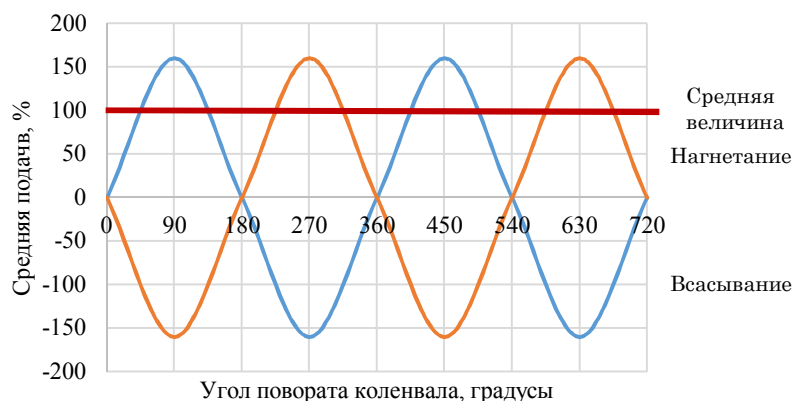


Рисунок 13 - Изменение производительности дуплекс-насоса

Электрической моделью дуплекс-насоса может служить однофазный выпрямитель со средней точкой, схема которого приведена на рис. 14.

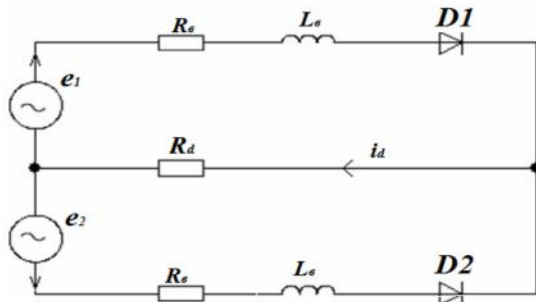


Рисунок 14 - Схема однофазного выпрямителя со средней точкой

Эта схема по существу представляет собой объединение двух рассмотренных выше однофазных однополупериодных выпрямителей, включенных на общую нагрузку R_d . ЭДС источников изменяются по синусоидальному закону, имеют одинаковую амплитуду и частоту, но сдвинуты по фазе друг относительно друга на 180° (как и плунжеры в насосной установке). Поэтому в одну половину периода напряжение положительно относительно одного диода, а в другую - относительно другого, т. е. диоды работают поочередно и в идеальных условиях (если пренебречь активным и реактивным сопротивлением ветвей схемы) проводят ток в течение половины периода.

Результаты схемотехнического моделирования некоторых режимов работы дуплекс-насоса приведены на рис. 16 и 17. На рис. 16 учтено наличие активного сопротивления в ветвях электрической модели, а на рис. 17, кроме указанного сопротивления, учтено также наличие индуктивностей в ветвях электрической модели. Как видим, проявляется такой же эффект, как и в электрической модели симплекс-насоса.

В результате выпрямленный ток и выпрямленное напряжение уже не имеют полупериодных перерывов, как наблюдалось в однофазной однополупериодной схеме выпрямления, хотя пульсации их продолжают оставаться значительными - от нуля до максимального значения. Закономерности изменения выпрямленного тока и выпрямленного напряжения будут соответствовать кривые, изображенные на рисунке 13.

Схемотехническая модель дуплекс-насоса изображена на рис. 15.

Работу трехпоршневого (или триплекс-насоса) в [5] представлено следующим образом. «За счет дополнительного третьего комплекта частей достигается существенное отличие, так как на две трети хода поршня имеются два плунжера, осуществляющих нагнетание одновременно, а на оставшуюся треть - один плунжер близок к максимальному расходу. Три расхода, сложенных вместе, обеспечивают плавную форму волнь». Это показано на рис. 18. «Несмотря на то, что график является теоретическим, в хорошо спроектированной

насосной системе изменение подачи будет происходить в соответствии с этой формой, хотя и не будет такой плавной.

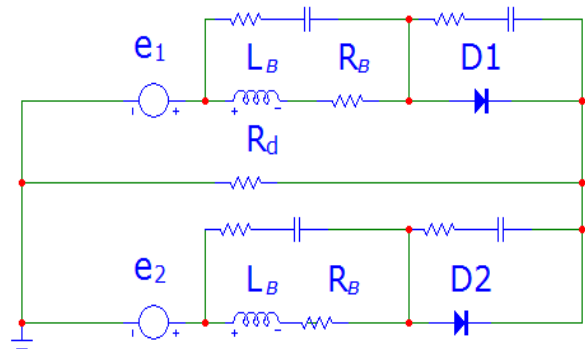


Рисунок 15 - Схемотехническая модель дуплекс-насоса

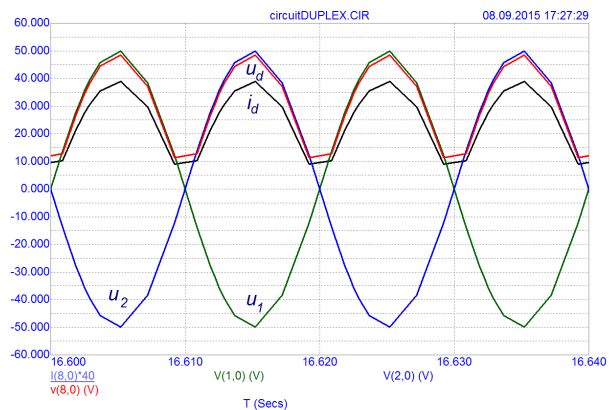


Рисунок 16 - Результаты схемотехнического моделирования с учетом активного сопротивления в электрической модели

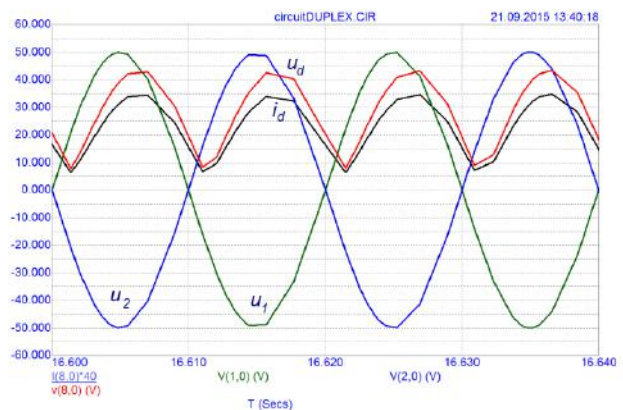


Рисунок 17 - Результаты схемотехнического моделирования с учетом активного и индуктивного сопротивления в электрической модели

Изменение подачи и, следовательно, крутящего момента составляет от 90 % до 104 % от средней величины, в общем 14 %.

Дополнительные комплекты рабочих органов не намного увеличивают плавность характеристики подачи, однако могут существенно повысить затраты, что приемлемо только для специальных случаев».

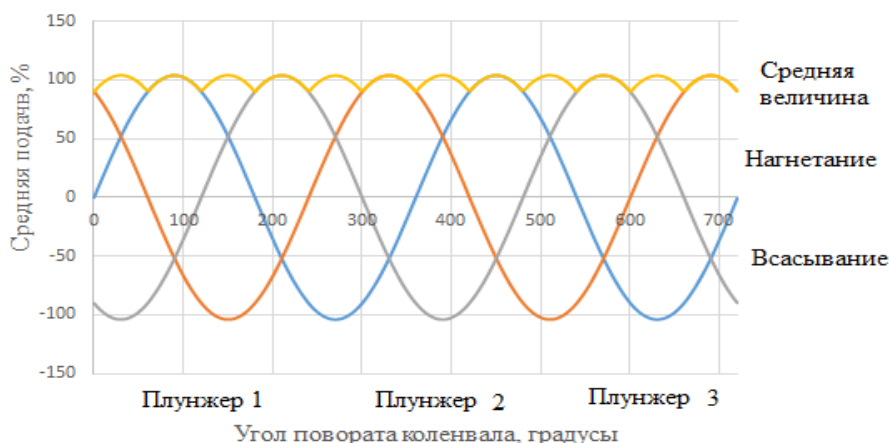


Рисунок 18 - Изменение производительности триплекс-насоса

Электрической моделью триплекс-насоса может служить трехфазный мостовой выпрямитель, схема которого приведена на рис. 19.

В этой схеме три диода объединены в катодную группу, а три других - в анодную. При работе схемы ток всегда проводят два вентиля: один в катодной группе, а другой в анодной. В любой момент времени в катодной группе будет открыт тот вентиль, потенциал анода которого выше потенциалов анодов других вентилях в группе, а в анодной группе - вентиль, потенциал катода которого ниже потенциалов катодов других вентилях группы [7]. Коммутация тока с одного вентиля на следующий, очередной в данной группе, происходит в моменты пересечения синусоид фазного напряжения источников ЭДС схемы.

На рис. 20 построены линейные ЭДС источников питания схемы и кривая выпрямленного напряжения u_d в идеализированных условиях работы, когда пренебрегается сопротивлениями ветвей схемы, а нагрузка является активной по характеру. Как видим, построенные кривые полностью совпадают по форме с приведенными на рис. 18.

Среднее значение выпрямленного напряжения определяется в интервале повторяемости, равном $\pi/3$:

$$U_d = \frac{1}{\pi/3} \int_0^{\pi/3} e dt = \frac{3}{\pi} \int_0^{\pi/3} E_m \sin\left(\vartheta + \frac{\pi}{3}\right) d\vartheta = \frac{3}{\pi} E_m.$$

Коэффициент, связывающий между собой амплитудное значение ЭДС источников схемы электрической модели триплекс-насоса и среднее значение выпрямленного напряжения, равен $\frac{3}{\pi} = 0,955$.

Если за 100 % принять среднее значение выпрямленного напряжения, то амплитудное составит от него 104 %, как и в анализе процессов в триплекс-насосе.

Изложенное является убедительной аргументацией в пользу идеи о моделировании процессов в электромеханических системах с поршневыми

насосами электрическими моделями, основной составной частью которых является преобразователь электрической энергии - выпрямитель. Причем такое моделирование охватывает как электромеханические системы с поршневыми насосами, так и с центробежными. Электрические модели последних являются более сложными и их целесообразно рассматривать как модели различных уровней.

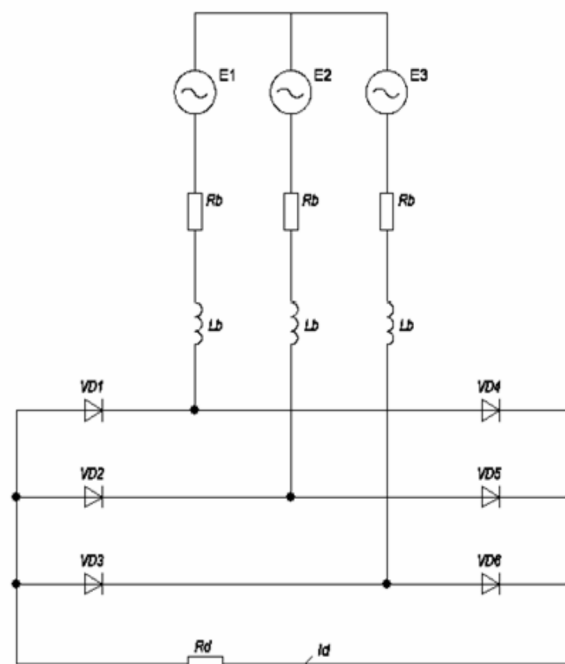


Рисунок 19 - Трехфазная мостовая схема выпрямления

Схема электрической модели ЭМС, в состав которой входит центробежный насос с однозавитковым спиральным отводом и рабочим колесом с шестью лопастями, приведена на рис. 21.

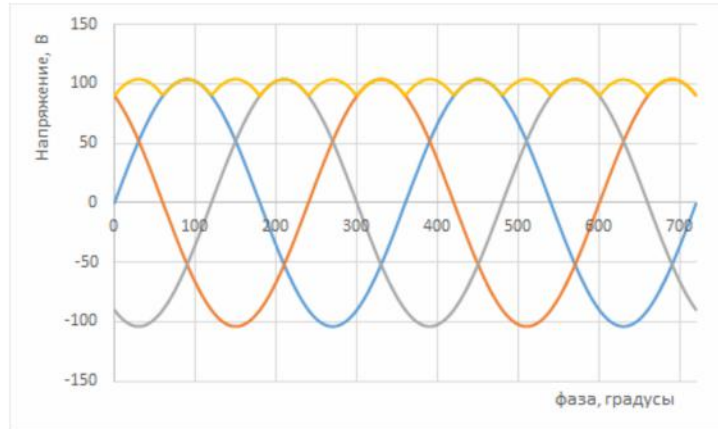


Рисунок 20 - Линейное напряжение источников ЭДС и выпрямленное напряжение

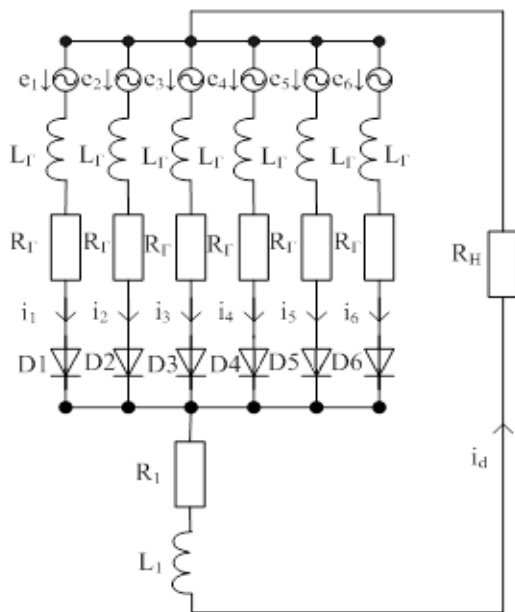


Рисунок 21 - Схема электрической модели ЭМС первого уровня

Такие модели, независимо от количества лопастей рабочего колеса, являются моделями первого уровня, учитывая более простую их схемную реализацию и более простой анализ происходящих в ней электромагнитных процессов. Частично результаты исследования электромагнитных процессов в электрических моделях первого уровня опубликованы в [8]. Адекватность результатов электрического моделирования реальным рабочим процессам в электромеханических системах сетей водоснабжения с центробежными насосами рассмотрена в [9].

Электрические модели ЭМС, в состав которой входит центробежный насос с двухзавитковым спиральным отводом и рабочим колесом с четным количеством лопастей, считаются моделями второго уровня из-за более сложной схемной реализации (рис. 22).

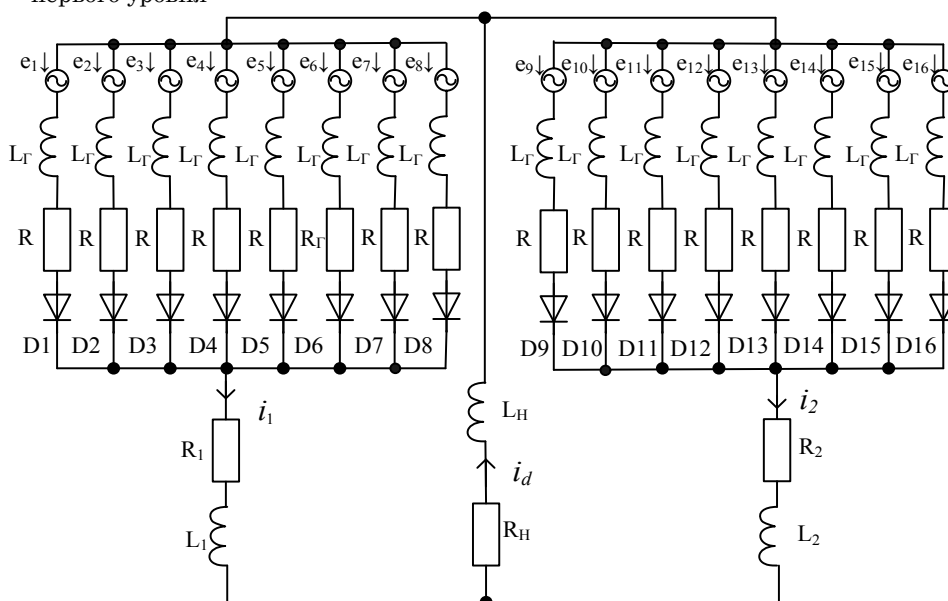


Рисунок 22 - Схема электрической модели ЭМС второго уровня

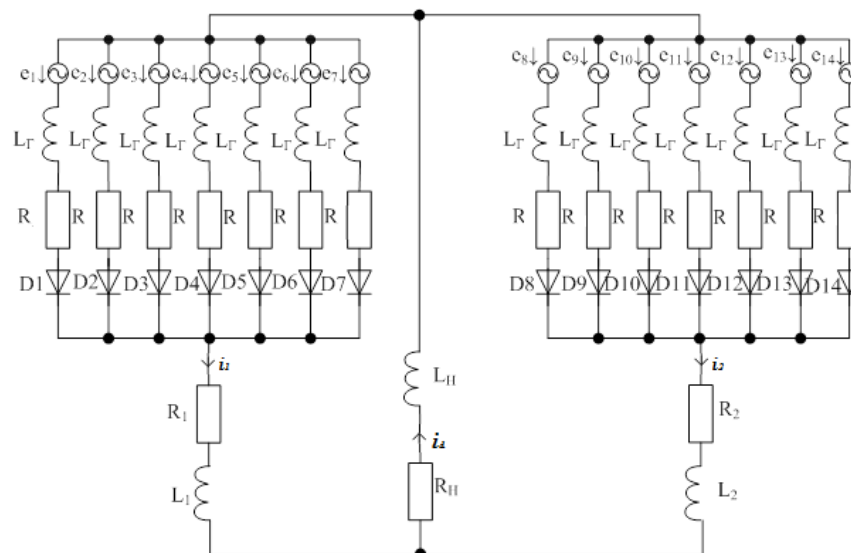


Рисунок 23 - Схема электрической модели ЭМС третьего уровня

Электрические модели ЭМС, в состав которых входит центробежный насос с двухзавитковым спиральным отводом и рабочим колесом с нечетным количеством лопастей, считаются моделями третьего уровня из-за более сложной схемной реализации и более сложного характера электромагнитных процессов (рис. 23).

Использование электрического моделирования рабочих процессов ЭМС и сети водоснабжения в целом позволяет определить требования к режиму работы сети, при котором энергоэффективность ее функционирования будет наиболее высокой.

ВЫВОДЫ

1. Принцип моделирования рабочих процессов электромеханических систем сетей водоснабжения охватывает как системы с поршневыми насосами, так и с центробежными.

2. В качестве электрических моделей электромеханических систем с поршневыми насосами можно использовать известные схемы однофазного и трехфазного выпрямлений, методика анализа электромагнитных процессов в которых разработана и используется при исследовании устройств энергетической электроники.

3. Эффективность методов электрического моделирования в сетях водоснабжения повышается при использовании их совместно с существующими методами численного эксперимента. При этом электрическое моделирование создает возможность оперативного анализа не только установившихся режимов, но и переходных и аварийных, а также позволяет рассматривать схему гидравлической сети как цепь с распределенными параметрами.

Electrical Modeling of Workflows in Electrical Systems of Water Supply Networks

V. Boiko¹⁾, M. Sotnyk²⁾

¹⁾ National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Prospect Peremohy, 37, Kyiv, Ukraine, 03056

²⁾ Sumy State University, 2, Rimsky Korsakov Str., Sumy, Ukraine, 40007

The article presents the results of research aimed at developing of scientific direction, which provides for analysis of energy processes in electromechanical systems of water supply networks using electric methods of modeling their workflows. The set of energy components of water supply network is considered as an electromechanical system. The components are electric motor, transmission mechanism and pump system for supplying fluid to the pump. The main part of the electrical model of electromechanical system is a converter of electrical energy (rectifier). Circuits single-phase and three-phase rectification, known in energy electronics, are used in models of electromechanical systems that contain piston pumps. The converter circuits of electrical energy are developed by authors for the implementation of electric models of electromechanical systems that contain centrifugal pump. It is divided into three levels depending on the complexity of circuit engineering realization and characteristics of electromagnetic processes. The method for analysis of electromagnetic processes in such models is developed and the adequacy of results of electrical modeling to real workflows in simulated water supply networks is proved.

Key words: pump, equivalent scheme, energy, energy efficiency, rectifier



Електричне моделювання робочих процесів в електромеханічних системах мереж водопостачання

В. С. Бойко¹⁾, Н. І. Сотник²⁾

¹⁾ НТУУ «Київський політехнічний інститут», просп. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

²⁾ Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, Україна, 40007

У статті наведено результати досліджень, спрямованих на розвиток наукового напрямку, який передбачає проведення аналізу енергетичних процесів в електромеханічних системах мереж водопостачання із застосуванням електричних методів моделювання їх робочих процесів. Електромеханічна система розглядається як сукупність енергетичних компонент мережі водопостачання: привідного електричного двигуна, передатних механізмів, насоса та системи підведення рідини до насоса. Основною складовою електричної моделі електромеханічної системи є перетворювач електричної енергії - випрямляч. У моделях електромеханічних систем, що містять поршневі насоси, використовуються відомі в енергетичній електроніці схеми однофазного та трифазного випрямлення. Для реалізації електричних моделей електромеханічних систем, що містять відцентрові насоси, автори розробили схеми перетворювачів електричної енергії, які залежно від складності схмотехнічної реалізації та особливостей електромагнітних процесів поділено на три рівні. Розроблено методику аналізу електромагнітних процесів у таких моделях та доведено адекватність результатів електричного моделювання реально існуючим робочим процесам у мережах водопостачання, що моделюються.

Ключові слова: насос, схема заміщення, енергія, енергоефективність, випрямляч

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Рязанов Г. А. Электрическое моделирование с применением вихревых полей / Г. А. Рязанов. – М.: Издательство «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, 1969. – 336 с.
2. Гликман Б. Ф. Нестационарные течения в пневмогидравлических цепях / Б. Ф. Гликман. - М.: Машиностроение, 1979. – 256 с.
3. Гликман Б. Ф. Математические модели пневмогидравлических систем / Б. Ф. Гликман. - М.: Наука, 1987. - 366 с.
4. Костышин В. С. Моделирование режимов работы центробежных насосов на основе электрогидравлической аналогии / В. С. Костышин. – Ивано-Франковск, 2000. – 163 с.
5. Регулирование частоты вращения насосного оборудования. Руководство для успешного применения. - М.: Изд-во ООО «СофтКом», 2011. - 200 с. Перевод с английского и публикация русской версии выполнены Российской ассоциацией производителей насосов (РАПН) с ограниченного разрешения Гидравлического института и Европамп.
6. Размадзе Ш. М. Преобразовательные схемы и системы / Ш. М. Размадзе, - М.: Изд-во "Высшая школа", 1987. – 527 с.
7. Руденко В. С. Основы преобразовательной техники / В. С. Руденко, В. И. Сенько, И. М. Чиженко - М.: Изд-во «Высшая школа», 1980. - 423 с.
8. Бойко В. С. Моделювання відцентрового насоса методом електродинамічної аналогії / В. С. Бойко, М. І. Сотник - // Технічна електродинаміка. - 2012. - Тематичний випуск. Частина 4 – С. 187 - 192.
9. Бойко В. С., Адекватність електричного моделювання робочих процесів у відцентровому насосі / В. С. Бойко, М. І. Сотник - // Технічна електродинаміка. - 2013. - №5 - С. 90 - 96.

REFERENCES

1. Rjazanov G.A. (1969). Jelektricheskoe modelirovanie s primeneniem vihrevykh polej [Electrical modeling using eddy fields]. Moscow: Nauka, Main edition of Physical and Mathematical Literature.
2. Glikman, B. F. (1979). Nestacionarnye techenija v pnevmogidravlicheskih cepjah [Unsteady flow in pneumatic and hydraulic circuits]. Moscow: Mashinostroenie.
3. Glikman, B. F. (1987). Matematicheskie modeli pnevmogidravlicheskih sistem [Mathematical models of pneumatic and hydraulic systems]. Moscow: Nauka.
4. Kostyshin, V.S. (2000). Modelirovanie rezhimov raboty centrobezhnyh nasosov na osnove jelektrogidravlicheskoj analogii [Modeling of operating modes of centrifugal pumps on the basis of electrohydraulic analogy]. Ivano-Frankovsk.
5. Hydraulic Institute and Europamp. (2011). Regulirovanie chastoty vrashhenija nasosnogo oborudovanija. Rukovodstvo dlja uspeshnogo primenenija [Control of rotation speed of the pump equipment. Guidelines for successful application].(Russian Association of Pump Manufacturers (RPM), Trans). Moscow: ООО "SoftKom".
6. Razmadze Sh.M. (1987). Preobrazovatel'nye shemy i sistemy [Converter Circuits and Systems]. Moscow: Vysshaja shkola.
7. Rudenko, V.S., Sen'ko, V.I., Chizhenko, I.M. (1980). Osnovy preobrazovatel'noj tehniky [Fundamentals of converter engineering]. Moscow: Vysshaja shkola.
8. Boiko, V. S., Sotnyk, M. I. (2012). Modeljuvannja vidcentrovogo nasosa metodom elektrodynamichnoi' analogii' [Modeling of the centrifugal pump by method of electrodynamic analogy]. Tehnichna elektrodynamika. Tematychnyj vypusk. - Technical electrodynamic. Thematic release, Vol. 4, pp. 187-192.
9. Boiko, V. S., Sotnyk, M. I. (2013). Adekvatnist' elektrychnogo modeljuvannja robochyh procesiv u vidcentrovomu nasosi [Adequacy of electrical modeling of working processes in the centrifugal pump]. Tehnichna elektrodynamika. - Technical electrodynamic, ser. 5, pp. 90-96.

Определение рациональных параметров обжига окатышей с твёрдым топливом на конвейерной машине

М. Н. Бойко¹⁾

¹⁾ *Национальная металлургическая академия Украины, проспект Гагарина, 4, г. Днепропетровск, Украина, 49600*

Article info:

Paper received:

26 October 2015

The final version of the paper received:

26 October 2015

Paper accepted online:

10 December 2015

Correspondent Author's Address:

¹⁾ maximboyko@i.ua

Рассмотрены вопросы использования твёрдого топлива для обжига окатышей на конвейерной машине, что позволяет снизить расход природного газа на обжиг и улучшить качество окатышей. Целью работы является определение рационального содержания углерода в окатышах для выравнивания их прочности по высоте слоя. Данный анализ проводился с использованием математической модели обжига окатышей. Установлено, что добавление до 1 % твёрдого топлива может значительно снизить перепад температур по высоте слоя, что повышает равномерность тепловой обработки окатышей. Дальнейшее повышение содержания твёрдого топлива требует дополнительных технологических мероприятий.

Ключевые слова: железорудные окатыши, тепловая обработка, твёрдое топливо, прочность окатышей.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

При обжиге окатышей на конвейерной машине нагрев производится за счёт сжигания газа над слоем, что вызывает неравномерный прогрев окатышей по высоте слоя и, как следствие, их различную прочность. Более равномерная тепловая обработка слоя по высоте возможна при использовании комбинированного топлива – твёрдого, добавляемого в шихту, и газообразного или жидкого, сжигаемого над слоем [1].

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Исследованиями [2, 3] установлено, что добавление твёрдого топлива в шихту позволяет снизить удельный расход природного газа, повысить прочность окатышей и уменьшить выход мелочи в спеченном продукте.

Закономерности горения твёрдого топлива в слое кускового материала, изученные при спекании агломерата, применимы для слоя окатышей с учётом его особенностей – большего размера гранул, большего диффузионного сопротивления, если топливо находится внутри окатыша, меньшей крупности топлива. Недостаточная концентрация кислорода и снижение температуры продуктов горения при нагреве ими окатышей мешают интенсивному горению топлива во всём объёме слоя. Твёрдое топливо горит в слое толщиной 100 – 180 мм, что значительно

больше, чем при агломерации. Это обеспечивает лучшее использование углерода и уменьшает концентрацию CO в отходящих газах [4].

Также следует отметить, что при добавках твёрдого топлива в шихту как для гематитовых, так и магнетитовых окатышей развиваются окислительно-восстановительные процессы. Степень их развития зависит от содержания углерода в шихте, положения окатыша по высоте слоя и расстояния по сечению окатыша [5]. На поверхности окатышей по всей высоте их слоя происходит горение углерода в токе окислительного теплоносителя. В магнетитовых окатышах, кроме горения топлива на поверхности окисляется магнетит. Поскольку концентрация CO на поверхности окатыша невелика, восстановления Fe_3O_4 не происходит. В центре окатыша восстановительные процессы развиваются в большей степени. Таким образом, за счёт горения углерода твёрдого топлива выделяется теплота в основном на поверхности окатыша, и значительное её количество газовым потоком передаётся нижележащим слоям.

ВЫДЕЛЕНИЕ НЕРЕШЕННЫХ РАНЕЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ ПРОБЛЕМЫ

Определённые трудности при использовании твёрдого топлива в шихте для производства окатышей вызывает вероятность образования при обжиге на конвейерной машине спёков в нижних горизонтах слоя при локальном избытке тепла и образовании

большого количества расплава. В результате этого снижаются качество обожженного продукта и производительность обжиговой машины.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью работы является определение по результатам моделирования рационального содержания углерода в окатышах для выравнивания их прочности по высоте слоя.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

В Национальной металлургической академии Украины на кафедре металлургии чугуна разработан математическая модель процесса обжига углеродсодержащих окатышей на конвейерной машине [6]. Модель включает описание реальных физико-химических и тепловых механизмов, вовлеченных в процесс обжига окатышей. Расчет параметров в этой системе основан на кинетических уравнениях и анализируется с позиций кинетики. Для случая топохимического реагирования расчет массопереноса основан на химическом взаимодействии и диффузии газового компонента в пограничной пленке и через пористый слой продукта реагирования.

Для определения прочности обожженных окатышей на сжатие разработана математическая модель, использующая частные подмодели для определения влияния на процесс упрочнения: химического состава исходных окатышей – через использование показателей основности, глиноземистого и магниеземного индексов; динамики нагрева окатышей; температурного режима обжига; размера окатышей.

При моделировании использовали следующие начальные условия: высота слоя окатышей 400 мм, диаметр окатышей 15 мм, основность окатышей 0,6, содержание в окатышах: кремнезёма 5,3 %, глинозема 1,9 %, магнезии 1,3 %,

В ходе предварительного моделирования установлено, что добавление твёрдого топлива в шихту может значительно сократить перепад температур по высоте слоя, однако при содержании углерода в окатышах более 1 % максимальная температура окатышей нижнего слоя превышает таковую для верхнего слоя за счет регенерации теплоты. Поэтому превышение содержания углерода более 1 % повышает неравномерность температуры окатышей. Углерод верхней части слоя почти полностью окисляется в зоне обжига, и теплота от его окисления используется для нагрева окатышей нижележащих горизонтов. При этом отмечено, что с увеличением содержания углерода в окатышах нагрев слоя принимает вид тепловой волны. С увеличением содержания углерода максимум температур слоя располагается на более низких горизонтах слоя. При увеличении количества углерода в слое его окисление происходит менее равномерно по высоте слоя, высота зоны интенсивного горения сокращается.

Результаты распределения прочности обожженных окатышей по высоте слоя для содержания углерода 0; 0,5; 1 и 1,5 % соответственно представлены на рисунке 1.

При обжиге углеродсодержащих окатышей температуру газов в зоне обжига необходимо снизить до уровня, чтобы окатыши нижних горизонтов слоя не нагрелись выше требуемой температуры обжига. Для указанных содержаний углерода температура газа-теплоносителя составляла 1280, 1200, 1100, 1000 °С. В результате этого при добавлении углерода прочность обожженных окатышей нижних слоев выше, чем верхних.

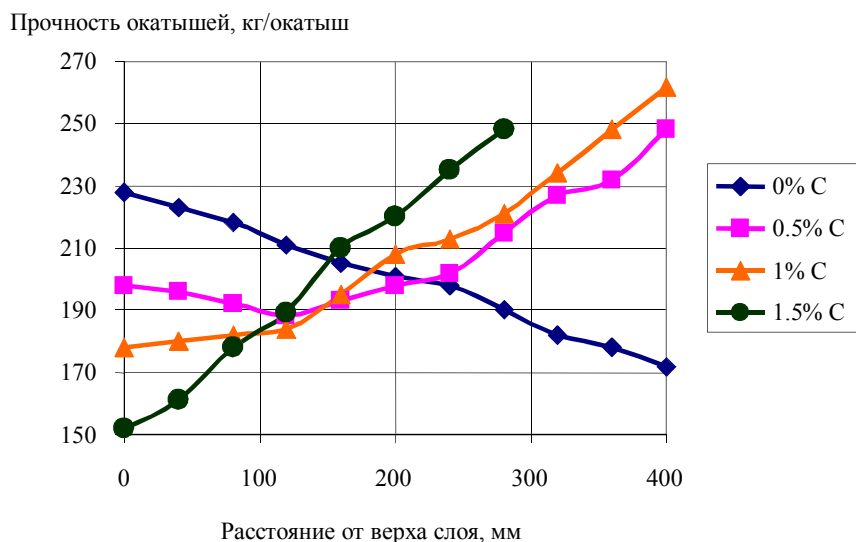


Рисунок 1 – Изменение конечной прочности окатышей по высоте слоя в зависимости от содержания углерода

При увеличении расхода твёрдого топлива (до 1,5 %) получить равномерно хорошее качество окатышей по высоте слоя не представляется возможным. В связи с большим накоплением теплоты в нижней части слоя температуру газа в зоне обжига требуется значительно снизить, при этом окатыши верхней части слоя будут обжигаться при заниженных температурах и, как следствие, приобретут низкую прочность. В то же время окатыши, расположенные в нижних горизонтах, получают избыток теплоты и переоплавятся, что ухудшит их качество.

При расходе твердого топлива 0,5 % достигается выравнивание конечной прочности окатышей по высоте слоя за счет более равномерной тепловой обработки. При этом температура в зоне обжига снижена с 1280 до 1200 °С, за счёт чего достигается экономия природного газа. А при повышении расхода твёрдого топлива до 1 % температура газа в горне зоны обжига снижена до 1000 °С для предотвращения перегрева окатышей низа слоя, при этом ока-

тыши верха слоя недополучают теплоту, что снизит их прочность. Возможным путём решения данной проблемы является использование в конструкции конвейерной машины последовательно двух зон обжига: первая зона с повышенной температурой газотеплоносителя для создания необходимых условий для упрочнения верха слоя и вторая - с пониженной температурой и повышенным содержанием кислорода для улучшения горения твёрдого топлива.

На рисунке 2 показано влияние добавки твердого топлива на максимальную, минимальную и средневзвешенную прочность окатышей. Видно, что с увеличением добавки твердого топлива до 0,5 % минимальная прочность окатышей достигает максимума, что связано с более равномерной тепловой обработкой слоя. Также при данном расходе твердого топлива достигается максимальная производительность (рис. 3), так как создаются хорошие условия для тепловой обработки окатышей и для достижения заданной прочности требуется меньшее время.

Прочность окатышей, кг/окатыш

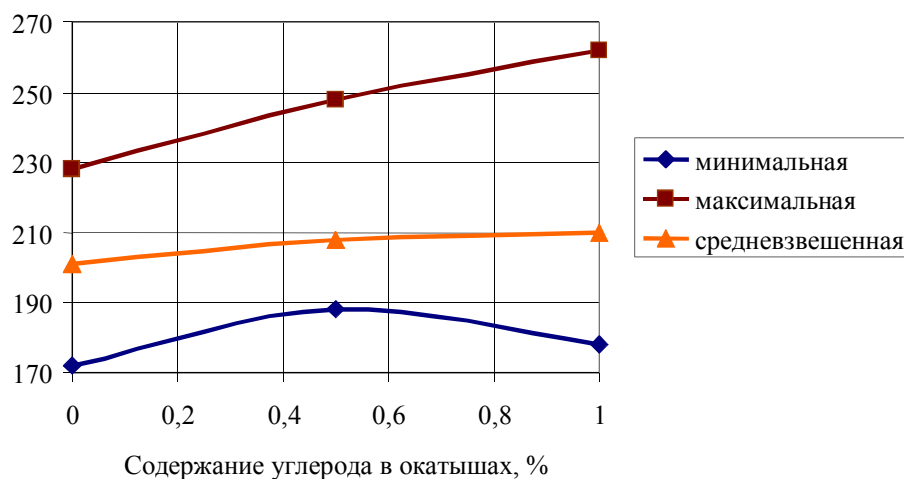


Рисунок 2 – Влияние добавки твердого топлива на прочность окатышей.

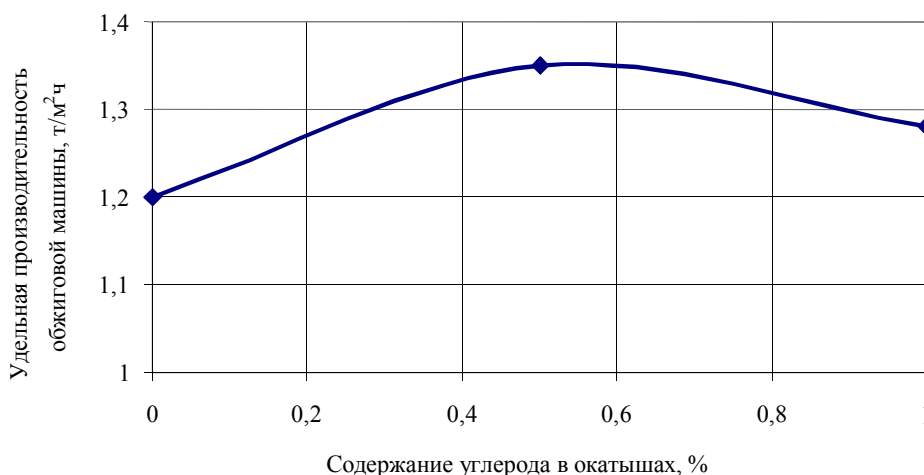


Рисунок 3 – Влияние добавки твердого топлива на производительность обжиговой машины

При повышении содержания твердого топлива до 1 % средняя прочность окатышей сохраняется на том же уровне, что и при 0,5 % топлива, а производительность несколько падает, что связано со снижением температуры теплоносителя в горне зоны обжига, и для достижения заданной прочности окатышей верха слоя требуется большее время.

ВЫВОДЫ

По результатам исследования на модели установлено, что добавление твердого топлива в шихту может значительно снизить перепад температур по высоте слоя, что повышает равномерность тепловой обработки окатышей.

Установлено, что при увеличении расхода твердого топлива более 1 % получить равномерно хорошее качество окатышей по высоте слоя не представ-

ляется возможным. В связи с большим накоплением теплоты в нижней части слоя температуру газа в зоне обжига требуется значительно снизить, при этом окатыши верха слоя будут обжигаться при заниженных температурах. Для анализа возможности увеличения количества твердого топлива планируется исследование двухзонного обжига с различной температурой газа-теплоносителя по зонам.

Determine the Rational Parameters of Burning Pellets with Solid Fuel on the Conveyor Machine

М. Н. Бойко¹⁾

¹⁾ *National Metallurgical Academy of Ukraine, 4 Gagarina avenue, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49600*

Issues of using solid fuel for burning pellets on a conveyor machine were considered. Its use can reduce the consumption of natural gas in the burning and improve the quality of pellets. The aim is to define rational carbon content in the pellets for alignment their strength adjustment height layer. The analysis was carried out using a mathematical model of burning pellets. The addition of up to 1% of a solid fuel can significantly reduce the temperature difference adjustment height layer. This improves the uniformity of the heat treatment of pellets. Further increasing the content of a solid fuel requires additional technological measures.

Keywords: iron ore pellets, heat treatment, solid fuel, the strength of the pellets.

Визначення раціональних параметрів відпалу котунів із твердим паливом на конвеєрній машині

М. М. Бойко¹⁾

¹⁾ *Національна металургійна академія України, проспект Гагаріна, 4, м. Дніпропетровськ, Україна, 49600*

Розглянуто питання використання твердого палива для відпалу котунів на конвеєрній машині, що дозволяє знизити витрати природного газу на випал і поліпшити якість котунів. Метою роботи є визначення раціонального вмісту вуглецю в котунах для вирівнювання їх міцності по висоті шару. Аналіз проводився із використанням математичної моделі відпалу котунів. Встановлено, що додавання до 1 % твердого палива може значно знизити перепад температур по висоті шару, що підвищує рівномірність теплової обробки котунів. Подальше підвищення вмісту твердого палива вимагає додаткових технологічних заходів.

Ключові слова: залізородні котуни, тепла обробка, тверде паливо, міцність котунів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ягольник М. В. Исследование термической обработки рудно-угольных окатышей применительно к условиям конвейерной обжиговой машины / М. В. Ягольник, В. П. Мовчан, Н. Д. Ванюкова // Теория и практика металлургии. – 2004. – № 2. – С. 3-9.

2. Евстюгин С. Н. О применении твердого топлива на обжиговых машинах / С. Н. Евстюгин, В. И. Клейн, В. В. Брагин // Сталь. – 2009. – № 8. – С. 8 - 11.

3. Чернега Д. Ф. Дослідження процесу спікання залізородних котунів із підвищеним вмістом твердого палива / Д. Ф. Чернега, В. М. Нецадим, П. Д. Кудь, Д. В. Іванченко // Наукові вісті Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". – 2013. – № 2. – С. 124 - 128.

4. Бережний М. М. Збагачення та окискування сировини / М. М. Бережний, В. П. Мовчан; за ред. М. М. Бережного. - Кривий Ріг : ЦГЗК, 2000. – 368 с.

5. Ковалев Д. А. Физико-химическая модель обжига железорудных окатышей в смеси с твердым топливом / Д. А. Ковалев, В. П. Мовчан // Теория и практика металлургии. – 2003. – № 3. – С. 12 - 16.

REFERENCES

1. Yagolnik, M. V., Movchan, V. P. & Vanyukova, N. D. (2004). Issledovanie termicheskoy obrabotki rudno ugolnyh okatyshej primenitelno k usloviyam konvejernoj obzhigovoj mashiny [Investigation of thermal processing of ore-coal pellets with respect to the conditions of the conveyor burning machine]. Teoriya i praktika metallurgii. – Theory and practice of metallurgy, 2, 3 - 9 [in Russian].

2. Evstyugin, S. N., Klejn, V. I. & Bragin, V. V. (2009) O primeneni tverdogo topliva na obzhigovyh mashinah [On the application of solid fuel in the burning machines]. Stal –Steel , 8, 8-11[in Russian].

3. Chernega, D. F., Neshchadim, V. M., Kud, P. D. & Ivanchenko, D. V. (2013). Doslidzhennya procesu spikannya zalizorudnyh kotuniv z pidvyshchenym vmistom tverdogo palyva [Investigation of the process of sintering of iron ore pellets with a high content of solid fuels]. Naukovi vist Nacionalnogo tekhnichnogo universitetu Ukrainy “Kiiivskij politekhnichnyj institut” – Scientific News National Technical

6. Ковалёв Д. А. Разработка динамической математической модели для управления обжигом углеродсодержащих железорудных окатышей / Д. А. Ковалёв, Н. Д. Ванюкова, М. Н. Бойко // Системні технології. – 2008. – № 1.– С. 93 - 102.

University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", 2, 124 - 128 [in Ukrainian].

4. Berezhnij, M.M. (2000). Zbagachennya ta okyskuvannya sировини [Enrichment and agglomeration of raw material].M.M. Berezhnij (Ed.), Krivij Rig: TSGZK [in Russian].

5. Kovalev, D. A. & Movchan, V. P. (2003) Fiziko himicheskaya model obzhiga zhelezorudnyh okatyshej v smesi s tverdyim toplivom [Physico-chemical model of burning of iron ore pellets in admixture with solid fuel]. Teoriya i praktika metallurgii. – Theory and practice of metallurgy, 3, 12 - 16 [in Russian].

6. Kovalyov D. A., Vanyukova N. D., Boyko M. N. (2008) Razrabotka dinamicheskoy matematicheskoy modeli dlya upravleniya obzhigom uglerodsoderzhashchih zhelezorudnyh okatyshej [Development of a dynamic mathematical model to control burning of iron ore pellets with carbon]. Sistemni tehnologii – Systemic technologies, 1, 93 - 102 [in Russian].



Електрохімічні характеристики високохромистого чавуну в різних структурних станах як фактор оцінювання його якості

Н. В. Полякова¹⁾

¹⁾ Національна металургійна академія України, проспект Гагаріна, 4, м. Дніпропетровськ, Україна, 49600

Article info:

Paper received:

27 October 2015

The final version of the paper received:

18 November 2015

Paper accepted online:

10 December 2015

Correspondent Author's Address:

¹⁾ lijanat@mail.ru

Розглянуто вплив структурного стану білого високохромистого чавуну на його здатність до електрохімічної корозії. Встановлено, що попередній високотемпературний вплив, який включав високотемпературну витримку та термоцикування, негативно позначається на корозійній стійкості високохромистого чавуну як у вихідному, так і у зношеному стані. Найбільша активізація процесу анодного розчинення, характерна для зразків, підданих термоцикуванню, пов'язана з утворенням на їх поверхні макро- та мікротріщин термічної втоми, що підтверджується дослідженнями її шорсткості. Зношена поверхня зразків демонструє інтенсифікацію анодного розчинення порівняно з вихідним станом після деякого його уповільнення на початку поляризації. Рекомендовано враховувати здатність високохромистого чавуну до електрохімічної корозії як додатковий чинник оцінювання якості робочого шару прокатних валків гарячої прокатки з огляду на складні умови їх експлуатації.

Ключові слова: високохромистий чавун, високотемпературний вплив, структурний стан, експлуатаційні властивості, прокатні валки, зносостійкість, електрохімічна корозія.

СТАН ПИТАННЯ

Істотний вплив на якість продукції, яку виготовляють методами гарячої прокатки, має обладнання, що використовується в технологічному процесі, зокрема - прокатні валки. Вимоги, що ставляться до цього відповідального інструмента прокатних станів, дуже різноманітні і стосуються, переважно, процесу їх виготовлення. На цьому етапі велике значення має раціональний вибір матеріалу робочого шару і створення умов для формування його оптимальної структури, здатної продемонструвати найкращі показники твердості і зносостійкості [1, 2, 3]. Білий високохромистий чавун завдяки високим показниками міцності широко застосовується для виготовлення двошарових валків гарячої прокатки [1]. Однак те, що виконується стосовно матеріалу, може істотно змінюватися щодо виробу, що обумовлено формою, розмірами та умовами експлуатації останнього. Оскільки знос валків у процесі експлуатації неминучий, має сенс цілеспрямоване зменшення його величини і збільшення рівномірності. При цьому відомо, що на величину і характер зносу можуть вплинути багато чинників. При комплексному їх впливі динаміка й характер зміни рельєфу поверхні в результаті зносу можуть істотно змінитися. Виходячи з цього, необхідно враховувати, що прокатні валки використовуються в умовах одночасного впливу високих температур на ділянці деформації, механічних та термоциклічних навантажень, а також - корозійно-активних середовищ [2].

Вплив зазначених факторів розширює коло вла-

стивостей, актуальних для забезпечення та/або збереження раціональних показників зносостійкості в процесі експлуатації прокатних валків із робочим шаром з високохромистого чавуну. Тому важливим є урахування здатності досліджуваного сплаву до кожного з можливих у таких умовах видів руйнування, для визначення домінуючого фактора зниження експлуатаційної стійкості прокатних валків та пошуку резервів її підвищення. У попередніх роботах [4, 5] було оцінено вплив газового середовища, високих температур і термоцикування на особливості зміни морфології поверхні, структури і фазового складу, а також зносостійкості високохромистого чавуну марки ГЧХ16НМФТ.

З урахуванням вищезазначеного нерозкритим залишається питання щодо можливості перебігу в описаних умовах корозійних процесів за електрохімічним механізмом.

Стан поверхні та особливості її рельєфу мають визначальний вплив на інтенсивність перебігу корозійних процесів. Велике значення має і те, що електрохімічна корозія – це гетерогенний процес, що супроводжується появою в системі електричного струму. Гетерогенність поверхні найчастіше викликається наявністю домішок інших металів, а також наявністю структурних складових сплавів [6]. Ділянки поверхні металу з більш негативним потенціалом складають аноди мікроелементів, ділянки з більш позитивним потенціалом - катоди. Тому високохромистий чавун належить до сплавів із яскраво вираженою гетерогенністю структури, що експлуатуються

в умовах впливу рідких корозійних середовищ, а також інших зазначених чинників, інтерес становить вивчення його здатності до корозійного руйнування, що відбувається за електрохімічним механізмом.

МЕТА РОБОТИ

Визначення здатності високохромистого чавуну марки ГЧХ16НМФТ у різних структурних станах до електрохімічного розчинення в корозійно-активному середовищі як чинника оцінювання якості робочого шару прокатних валків.

МАТЕРІАЛИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом дослідження були зразки білого високохромистого чавуну марки ГЧХ16НМФТ, вирізані з поверхневої частини двошарового експериментального вилітка, одержаного методом відцентрового лиття, що моделював прокатний валок.

Хімічний склад зразків, %: С - 2,65; Cr - 17,5; Ni - 1,3; Mo - 1,14; Ti - 0,022; V - 0,38; Mn - 0,04; Si - 0,7; Cu - 0,15.

Випробуванням були піддані такі зразки:

- у литому стані (тип 1);
- після високотемпературної обробки за режимами: 10 циклів нагрівання до 600 °С та різкого охолодження до 20 °С,

(тип 2), витримка при 600 °С упродовж 10 год. (тип 3);

- після випробувань зазначених трьох типів зразків на ударно-абразивний знос;

Особливості структуроутворення та фазових і структурних змін у досліджуваних зразках докладно описані в [4,5,7].

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

Полярizaційні дослідження проводилися потенціодинамічним методом, тобто досліджуваному електроду задавався потенціал при певній швидкості його розгортки в часі, і фіксувалася зміна сили струму [6]. У результаті були одержані анодні криві залежності густини струму розчинення від електродного потенціалу в координатах: потенціал, В - густина струму, А / м². Дослідження проводили за допомогою потенціостата ПІ-50-1 і програматора ПР-8. Як робочий використовували електрод із високохромистого чавуну марки ГЧХ16НМФТ у різних структурних станах. Площа поверхні робочого електрода - 0,5 см². Як електрод порівняння використовували хлорсрібний електрод. Допоміжним був платиновий електрод. Вимірювання сили струму проводили за допомогою міліамперметра типу М244. Робочий розчин - 5 % NaCl.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

У першій серії дослідів одержані результати оцінювання попереднього високотемпературного впливу на корозійну поведінку високохромистого чавуну (рисунок 1 а). Аналізуючи їх, можна зазначити, що зі збільшенням анодної поляризації найбільш інтенсивне зростання густини струму розчинення характерне для зразків, підданих попередньому високотемпературному впливу (типи 2,3). Проведення дослі-

джень дозволило встановити різний характер перебігу електрохімічного розчинення, обумовленого різницею потенціалів двох основних структурних складових високохромистого чавуну. Отже, впливи, що викликають зміни в структурі, призводять також до змін електрохімічних характеристик структурних складових досліджуваного сплаву. Так, ймовірно, металева матриця стає більш електронегативною. Це може бути пов'язано з процесами перерозподілу легувальних елементів у матриці, що відбуваються в результаті високотемпературного нагріву [4], які призводять до зміни її потенціалу та зменшення корозійної стійкості.

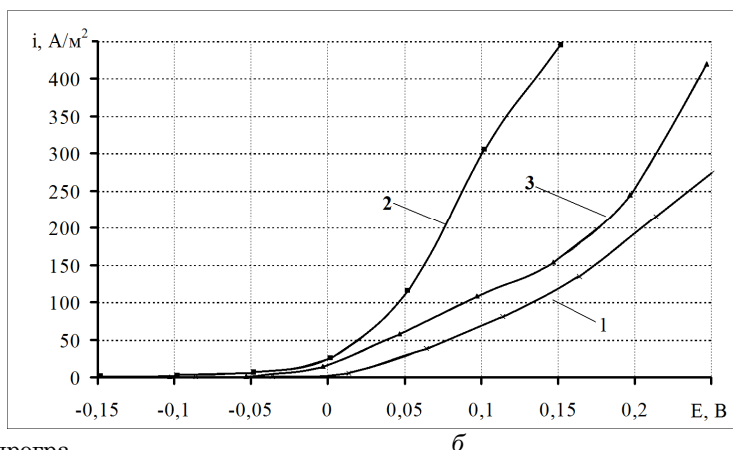
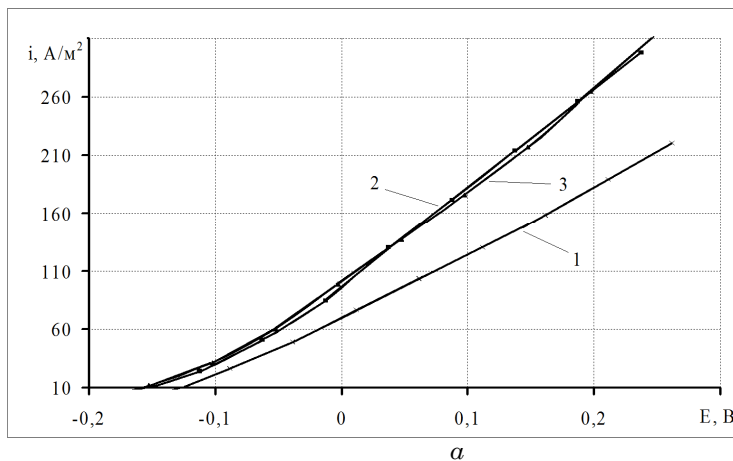


Рисунок 1 - Анодні поляризаційні криві високохромистого чавуну в 5 % NaCl в литому стані і після високотемпературної обробки до (а) та після (б) випробувань зносостійкості:
1 - литий стан; 2 – термоциклування;
3 - високотемпературна витримка.

Здатність до корозійного руйнування зразків, що були піддані термоциклуванню (тип 2), додатково збільшується завдяки утворенню термовтомних тріщин, виникнення яких доведене і обґрунтоване в [5], що збільшують площу поверхні, що контактує з електролітом, і створюють додаткові локальні мікрогальванічні елементи типу вершина тріщини - стінки тріщини [6]. Цим можуть пояснюватися максимальні

значення густини струму розчинення для зразка чавуну типу 2.

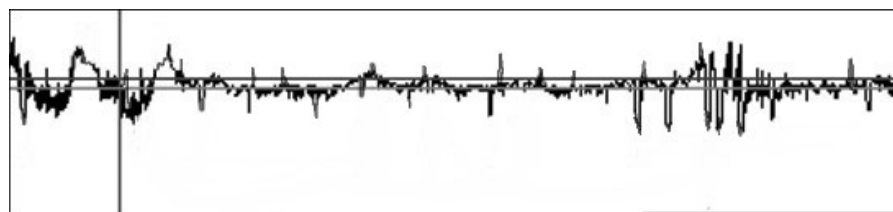
Зміну рельєфу поверхні зразків високохромистого чавуну після різних видів високотемпературних впливів демонструють результати дослідження її шорсткості, наведені на рис. 2. Ці дані свідчать про збільшення площі контакту з електролітом поверхні зразків, що зазнали попереднього температурного впливу, що відбивається на їх корозійній стійкості.

У другій серії дослідів були одержані результати оцінки впливу структурних змін, що спричинені ударно-абразивним зношенням, на схильність високохромистого чавуну до корозійного руйнування, яке проходить за електрохімічним механізмом (рис. 1 б). З нього бачимо, що характер впливу структурних змін, які спричинені попередньою високотемпературною обробкою, справедливий як для зразків у вихідному стані, так і для зношених. Тобто піддані попередній високотемпературній обробці зразки чавуну після випробувань зношення зберігають тенденцію до більш інтенсивного розчинення, ніж зразки в литому стані. Аналіз і зіставлення даних, поданих на рисунках 1 а та 1 б свідчать про те, що на початкових стадіях поляризації густина струму розчинення у зразків у вихідному стані змінюється швидше, ніж у зношених. Можливо, це пов'язано з поверхневим деформаційним зміцненням, що відбуваються в результаті випробувань на ударно-абразивне зношення, що, як відомо, сповільнює проходження коро-

зійних процесів у початковий період випробувань, але прискорює корозійне руйнування підповерхневої зони, що перебуває в напруженому стані [6]. Це підтверджується результатами досліджень, поданих на рисунку 1 б, які демонструють істотну інтенсифікацію розчинення вже після нульового потенціалу.

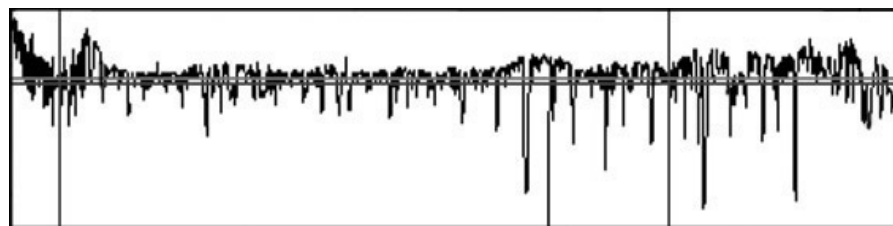
Зовнішній вигляд ділянок зразків, що були піддані електрохімічним випробуванням, свідчить про їх вибіркове розчинення. Так, відбувається значне розчинення металевої матриці й оголення карбідів (на поверхні всіх зразків виявляється рельєф карбідної сітки).

Аналіз одержаних даних та попередніх публікацій свідчить про те, що позитивний вплив на електрохімічні характеристики високохромистого чавуну марки ІЧХ16НМФТ може спричинити термічна обробка, спрямована на одержання бейнітної структури матриці. Попередні дослідження таких важливих для експлуатації прокатних валків властивостей, як зносостійкість, жаростійкість та термостійкість також свідчать про позитивний досвід випробувань чавунів з бейнітною структурою матриці [4, 5, 7]. З урахуванням цього можна очікувати, що використання термічної обробки прокатних валків із високохромистого чавуну за режимами, які стабілізують структуру і збільшують її стійкість до впливу експлуатаційних чинників, може сприяти поліпшенню їх якості та подовженню терміну безвідмовної служби.



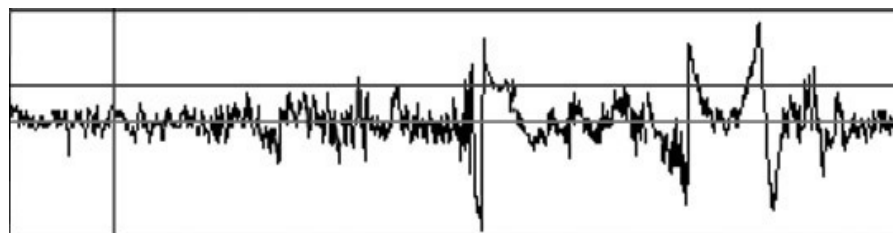
$R_a - 0,32; R_z - 4,22; R_{max} - 5,57; R_p - 2,10; R_v - 3,47; S_m - 24,4;$
Клас шорсткості – 8в

а



$R_a - 0,65; R_z - 7,91; R_{max} - 10,1; R_p - 3,09; R_v - 7,01; S_m - 31,4;$
Клас шорсткості – 7в

б



$R_a - 0,80; R_z - 7,83; R_{max} - 11,10; R_p - 5,41; R_v - 5,66; S_m - 51,80;$
Клас шорсткості – 7б

в

Рисунок 2 - Профіль поверхні та значення параметрів шорсткості зразків чавуну: а – у литому стані (тип 1); б – після термоцикування (тип 2); в – після високотемпературної витримки (тип 3)

ВИСНОВКИ

Білий високохромистий чавун марки ГЧХ16НМФТ виявив істотну схильність до корозійного руйнування за умов анодної поляризації, зумовлену значною гетерогенністю його структури. Це дозволяє рекомендувати врахування корозійної стійкості як додаткового чинника оцінювання якості поверхні матеріалів валків гарячої прокатки. При цьому продукти розпаду аустеніту визначені як анодні ділянки, а катодними є евтектичні карбіді.

Попередня високотемпературна обробка негативно вплинула на корозійну стійкість високохромистого чавуну. Максимальні значення густини струму спостерігалися при випробуванні зразків попередньо підданих термоциклованню, що може бути пов'язано з утворенням тріщин термічної втоми, які збільшують площу контакту поверхні металу з електролітом, а також сприяють виникненню додаткових мікрогальванічних елементів.

Анодне розчинення зразків чавуну, що були піддані випробуванням ударно-абразивного зноення, проходить уповільнено на початкових етапах поляризації та істотно інтенсифікується надалі, що може бути пов'язано з утворенням зони поверхневого деформційного зміцнення.

Візуальний контроль поверхні зразків високохромистого чавуну після електрохімічних досліджень дозволив спостерігати значне руйнування металевої матриці й оголення евтектичних карбідів.

Перспективним напрямом подальших досліджень може бути оцінювання сумісного впливу експлуатаційних чинників на забезпечення та (або) збереження високої зносостійкості матеріалів робочого шару прокатних валків.

Electrochemical Characteristics of High Chromium Cast Iron in Different Structural States as a Factor of Quality Estimation of the Hot Rolling Mill Rolls Working Layer

N. V. Poliakova¹⁾

¹⁾ National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Gagarina avenue, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49600.

High-chromium cast iron is used for rolling mill rolls production. A better knowledge of electrochemical corrosion destruction mechanisms of this material could be useful for a better appreciation of its service behavior and lifetime. The experimental specimens of high-chromium cast iron in different structural states were tested by potentiodynamic method. Propensity of investigated alloy to the destruction caused by corrosion active environments was shown. Peculiarities of electrochemical dissolution of investigated iron were studied. The influence of structural changes of high chromium iron that occur during preliminary high temperature exposure was analyzed. It may be recommended to take into account electrochemical properties of materials hot rolling mill rolls as an additional criterion of quality.

Keywords: high chromium cast iron, high temperature exposure, structural state, rolling mill rolls, wear resistance, electrochemical corrosion.

Электрохимические характеристики высокохромистого чугуна в различных структурных состояниях как фактор оценки его качества

Н. В. Полякова¹⁾

¹⁾ Национальная металлургическая академия Украины, проспект Гагарина, 4, г. Днепропетровск, Украина, 49600

Рассмотрено влияние структурного состояния белого высокохромистого чугуна на его склонность к электрохимической коррозии. Установлено, что предыдущее высокотемпературное влияние, включающее высокотемпературную выдержку и термоциклирование, негативно сказывается на коррозионной стойкости высокохромистого чугуна, как в исходном, так и в изношенном состоянии. Наибольшая активизация процесса анодного растворения, характерная для образцов, подвергнутых термоциклированию, связана с образованием на их поверхности макро- и микротрещин термической усталости, что подтверждается исследованиями ее шероховатости. Изношенная поверхность образцов демонстрирует интенсификацию анодного растворения по сравнению с исходным состоянием, после некоторого его замедления в начале поляризации. Рекомендовано учитывать склонность высокохромистого чугуна к электрохимической коррозии, как дополнительный фактор оценки качества рабочего слоя прокатных валков горячей прокатки, исходя из сложных условий их эксплуатации.

Ключевые слова: высокохромистый чугун, высокотемпературное влияние, структурное состояние, эксплуатационные свойства, прокатные валки, износостойкость, электрохимическая коррозия.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Hot friction and wear behaviour of high speed steel and high chromium iron for rolls / M. Pellizzari, D. Cescato, M. G. De Flora // 17th International Conference on Wear of Materials (15 June 2009, Las Vegas, USA) // *Wear*. - 2009. - Volume 267, Issues 1-4, p. 467 - 475
2. Improvement of the work roll performance on 2050 mm hot strip mill at ISCOR VANDERBIJLPARK / R. J. Skoczynski, G. Walmag, J. P. Breyer // International ATS Steelmaking Conference. - Paris (France), 2000. - p. 105 - 112.
3. Microstructural, mechanical and tribological characterisation of roll materials for the finishing stands of the hot strip mill for steel rolling / M. Nilssona, B. M. Olssona, // *Wear*. - 2013. - Volume 307, Issues 1-2. p. 209 - 217
4. Пинчук С. И. Влияние высокотемпературного воздействия на структуру и фазовый состав белого высокохромистого чугуна / С. И. Пинчук, Н. В. Полякова // *Металозна-*

REFERENCES

1. Pellizzari, M., Cescato, D., & De Flora, M. G. (2009). Hot friction and wear behaviour of high speed steel and high chromium iron for rolls. *Wear*, Vol. 267, 1-4, 467 - 475
2. Skoczynski, R. J., Walmag, G., & Breyer, J. P. (2000) Improvement of the work roll performance on 2050 mm hot strip mill at ISCOR VANDERBIJLPARK: International ATS Steelmaking Conference. (pp. 105 - 112). Paris.
3. Nilssona, M., & Olssona, M. (2013) Microstructural, mechanical and tribological characterisation of roll materials for the finishing stands of the hot strip mill for steel rolling. *Wear*, Vol. 307, 1-2, 209 - 217.
4. Pinchuk, S. I., & Poliakova, N. V. (2008). Vliyanie vysokotemperaturnogo vozdeystviya na strukturu i fazovyy sostav belogo vysokohromistogo chuguna [Effect of high temperature effects on the structure and phase composition of white high chrome cast iron]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv – Metallurgy and heat treatment of metals*, 3, 32 - 39 [in Russian].
5. Pinchuk, S. I., & Poliakova, N. V. (2008). Struktura i

stvo ta termichna obrobka metaliv. - 2008. - № 3. - С.32 - 39.

5. Пинчук С. И. Структура и свойства высокохромистого чугуна как материала для производства прокатных валков / С. И. Пинчук, Н. В. Полякова // *Металознавство та термічна обробка металів*. - 2008. - № 1. - С.24 - 34.
6. Stansbury E. E. Fundamentals of electrochemical corrosion / E. E. Stansbury, R. A. Buchanan. - ASM International, Materials Park, Ohio, 2000. - 487 pp.
7. Кравченко А. В. Особенности структурообразования и разработка способов повышения механических свойств и износостойкости высокохромистых чугунов: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. Наук : спец. 05.02.01 «Материаловедение» / А. В. Кравченко. - Днепропетровск. 2008. - 20 с.

svojstva vysokohromistogo chuguna kak materiala dlja proizvodstva prokatnyh valkov [The structure and properties of high chrome cast iron as a material for the production of rolls] *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv Metaloznnavstvo ta termichna obrobka metaliv – Metallurgy and heat treatment of metals*, 1, 24 - 34 [in Russian].

6. Stansbury E. E., Buchanan R. A. (2000) Fundamentals of electrochemical corrosion - Ohio: ASM International, Materials Park.
7. Kravchenko A. V. (2008) Osobennosti strukturo-obrazovaniia i razrabotka sposobov povysheniia mehanicheskikh svojstv i iznosostojkosti vysokohromistykh chugunov. [Features of structure forming and development of ways to improve the mechanical properties and wear resistance of high chromium cast iron]. Extended abstract of candidate's thesis. Dnepropetrovsk. [in Russian].

Моделювання розподілу концентрації викидів від автотранспорту у просторіР. А. Васькін¹⁾, В. О. Соляник²⁾, І. В. Васькіна¹⁾^{1), 2), 3)} Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, Україна, 40007**Article info:**

Paper received:

The final version of the paper received:

Paper accepted online:

30 October 2015

09 December 2015

10 December 2015

Correspondent Author's Address:¹⁾ r.vaskin@gmail.com

Зростання кількості автотранспорту на дорогах України зумовлює необхідність достовірного аналізу і прогнозу екологічної обстановки поблизу магістралей. Це дослідження присвячене питанням моделювання розподілу концентрації викидів від автотранспорту при різних вихідних даних. На основі дифузійної моделі була розроблена модель, яка дозволяє описати загальний фон забруднення при заданій інтенсивності автотранспортного потоку на ділянці магістралі, а також з урахуванням зміни інтенсивності викиду при різних режимах роботи двигуна: під час розгону, гальмування та під час зупинки автомобіля. У статті наведені результати розрахунків зміни концентрації залежно від початкової концентрації шкідливих речовин, швидкості руху автомобіля, коефіцієнта дифузії. При вирішенні поставленого завдання було використано підхід, який дозволяє одержати просторове поле концентрації за будь-якого стану атмосфери та швидкості повітряного потоку. Також були визначені коефіцієнти зниження інтенсивності викидів залежно від відстані та напрямку руху транспорту на конкретному перехресті. Адекватність запропонованої математичної моделі для оцінювання підтверджують результати експериментальних досліджень інших авторів. Перевагами пропонованої моделі є використання мінімуму експериментальних даних та легке програмування у прикладних математичних пакетах.

Ключові слова: математична модель, конвекція, дифузія, інтенсивність, гальмування, розгін.

ВСТУП

Постійне зростання кількості автотранспорту на дорогах України призводить до збільшення загальної кількості викидів від автомобільних двигунів. Це призводить до порушення екологічної рівноваги. Щоденно у повітря викидається величезна кількість різних речовин (окиси карбону, нітрогену, частинки сажі, важких металів та ін.). Головним джерелом шкідливих викидів під час руху автомобіля є двигун. Витрата палива, а отже, і викиди відпрацьованих газів залежать від режиму роботи двигуна, що задається водієм і дорожніми умовами. Таким чином, змінюючі параметри трансмісії (її передавальні числа), для певного режиму руху можна досягти мінімальних значень витрати палива і відповідно викидів відпрацьованих газів. Для достовірного аналізу й прогнозу екологічної обстановки і визначення оптимальних режимів експлуатації автомобіля необхідні математичні моделі, що базуються на глибокому рівні фізичного опису екологічних систем.

МЕТА ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Метою цієї роботи є розроблення моделі розподілу концентрації викидів від автотранспорту. Завданням дослідження є вирішення завдання визначення зміни інтенсивності викидів з ураху-

ванням різних режимів роботи двигуна (розгін, гальмування, зупинка).

АНАЛІЗ ПУБЛІКАЦІЙ

Для одержання достовірних характеристик про рівні забруднення атмосфери викидами автотранспорту потрібно проводити численні і часто масштабні відбори проб з встановленням концентрацій газів, аерозольних випадів поблизу магістралей. Це спричинює великі матеріальні витрати. Тому на практиці ця проблема, як правило, вирішується побудовою фізико-аналітичних моделей процесів емісії та розсіювання шкідливих речовин у атмосферному повітрі. Моделі будуються з певними припущеннями, адекватними відповідно до вирішення конкретного завдання. Детальна класифікація таких математичних моделей наведена у монографії [1]. Найбільш відомими реалізаціями подібних моделей є програмні продукти Aermod, Calpuff, ADMS-3, Caline3, OCD.

Принципово можлива побудова математичних моделей поширення домішок в атмосфері й інших середовищах на основі повної системи рівнянь механіки суцільного середовища. Разом із тим такий підхід для вирішення інженерних завдань здебільшого важко реалізувати на практиці. Необхідно також мати на увазі, що в таких моделях потрібно заздалегідь знати багато характе-

ристик системи, які можуть бути визначені лише емпірично. Отже, доцільно розвивати компромісні моделі, які мали б чітке фізичне обґрунтування і в той самий час дозволяли одержувати достовірні оцінки ситуації з мінімальними витратами й емпіричних досліджень.

Завдання побудови таких моделей було сформульовано ще в роботі [2]. У цій самій роботі було висловлено пропозицію про необхідність розвитку моделей дифузійного типу для вирішення зазначених завдань. Ряд дифузійних моделей використовується і сьогодні для оцінювання параметрів поширення забруднювальних домішок в атмосфері (ейлерові моделі, гаусові моделі, лагранжеві моделі) [1, 3]. Ці моделі є базовим математичним апаратом для побудови інших моделей. Але аналіз показує, що практична реалізація таких математичних моделей є складною системою, оскільки вимагає враховувати такі фактори, як турбулентність повітряних потоків, перенесення теплоти, твердих частинок, динаміку водяної пари, конденсацію та випаровування. Недоліком цих моделей також є їх цільовий характер, тобто спрямованість на вирішення вузьких завдань за максимального використання великого обсягу емпіричних даних. Отже, вище перелічені проблеми зумовлюють актуальність нашого дослідження.

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ ВИКИДІВ ВІД АВТОТРАНСПОРТУ

Спираючись на відомий математичний апарат [4], за основу нашої моделі візьмемо рівняння конвективної дифузії, але використаємо ефективний коефіцієнт дифузії:

$$I(x, y, z, t) + D_{\text{ef}} \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial C}{\partial t} + V_x \frac{\partial C}{\partial x} + V_y \frac{\partial C}{\partial y} + V_z \frac{\partial C}{\partial z} \quad (1)$$

де $I(x, y, z, t)$ - інтенсивність джерела викидів;

D_{ef} - ефективний коефіцієнт дифузії;

C - концентрація домішки;

V_x, V_y, V_z - компоненти вектора швидкості

повітряного потоку;

x, y, z - поточні координати у системі координат із центром у джерелі викидів;

t - час впливу.

Візьмемо, що швидкість поширення викидів від автомобіля (V_y) змінюється від 0 до певного сталого значення (амплітуди) V_s на заданій висоті, а вертикальну складову конвективного потоку беремо сталою V_c й ототожнюється в нашому випадку з характерною швидкістю осадження частинок сажі [3]. Розподіл швидкості руху повітря у приземному шарі атмосфери змінюється за експоненціальним законом [4]. Тоді можна записати:

$$\begin{aligned} V_x &= 0, \\ V_y &= V_s \left(1 - \exp\left(-\frac{z}{H^*}\right) \right), \\ V_z &= V_c, \end{aligned}$$

де V_s - амплітуда горизонтальної складової швидкості викиду; H^* - характерна висота викиду (приймається рівною 0,5 м).

У нашому випадку можливі дві постановки завдання для цієї моделі.

У першому випадку завданням є опис загального фону забруднення при заданій інтенсивності автотранспортного потоку на ділянці магістралі.

Для розв'язання цього завдання можна використовувати стаціонарну модель [4]:

$$D_{\text{ef}} \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) = V_s \left(1 - \exp\left(-\frac{z}{H^*}\right) \right) \frac{\partial C}{\partial y} + V_c \frac{\partial C}{\partial z} \quad (2)$$

з початковою умовою $C(H^*) = C^*$, $C(0) = 0$.

Тоді рівняння (2) можна подати у вигляді

$$\begin{aligned} D_{\text{ef}} \frac{H}{V_c} \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) &= \\ &= \frac{H^*}{V_c} V_s \left(1 - \exp\left(-\frac{z}{H^*}\right) \right) \frac{\partial C}{\partial y} + H^* \frac{\partial C}{\partial z}, \end{aligned} \quad (3)$$

де H^* - висота джерела викидів.

У результаті одержуємо безрозмірне рівняння такого вигляду

$$\bar{D}_{\text{ef}} \left(\frac{\partial^2 C}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial Z^2} \right) = \chi \left(1 - \exp(-Z) \right) \frac{\partial C}{\partial Y} + \frac{\partial C}{\partial Z}, \quad (4)$$

$$\text{де } \bar{D}_{\text{ef}} = \frac{D_{\text{ef}} \phi}{H^* V_c}, \quad \chi = \frac{V_s}{V_c},$$

$$X = \frac{x}{H^*}, \quad Y = \frac{y}{H^*}, \quad Z = \frac{z}{H^*}.$$

Для подальшого спрощення розрахунків згідно з рівнянням (4) вводимо безрозмірний комплекс k ($k = \frac{\chi}{\bar{D}_{\text{ef}}}$), що характеризує зміну швидкості

дифузійних процесів за висотою.

Друга постановка завдання пов'язана із розв'язанням задачі з урахуванням зміни інтенсивності викиду за різних режимів роботи двигуна під час розгону, гальмування та під час зупинки. Використовуючи запропоновану модель, можна подати стаціонарну картину розподілу концентрації забруднювальних речовин на перехрестях і на ділянках руху між перехрестями. На рисунках 1, 2 наведені результати розрахунків, із використанням пакета MATLAB5 при значеннях параметрів: ефективний коефіцієнт дифузії $\bar{D}_{\text{ef}} = 10^{-4}$, безрозмірний комплекс $k = 200; 150; 100; 60$, характерна висота викидів $\bar{H}^* = 0,5$ м.

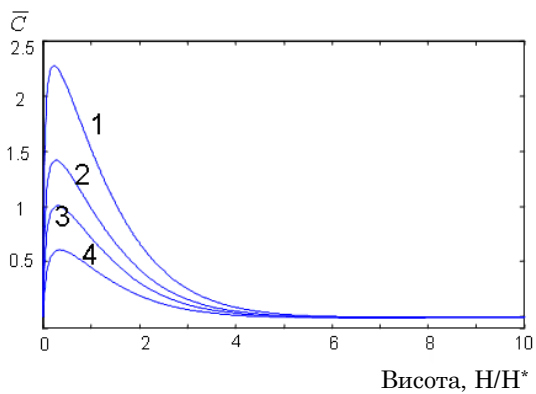


Рисунок 1 – Зміна концентрації забруднень за висотою за різної початкової концентрації на рівні H^* : 1 – $k = 60$; 2 – $k = 100$; 3 – $k = 150$; 4 – $k = 200$

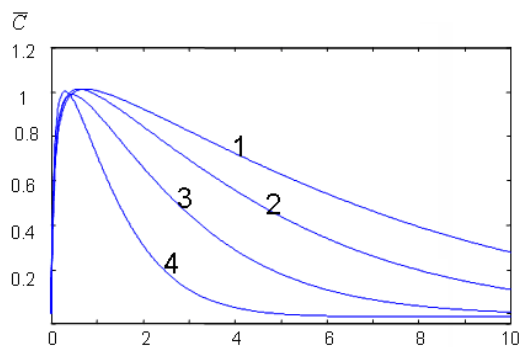


Рисунок 2 – Зміна концентрації забруднень за висотою за різної швидкості автотранспорту: 1 – $k = 60$; 2 – $k = 100$; 3 – $k = 150$; 4 – $k = 200$

На рисунку 3 показані розрахункові дані згідно з другою постановкою завдання. Тут взято певну підвищену концентрацію на перехресті і розраховано зміну цієї концентрації на заданій висоті за довжиною до наступного перехрестя за різних ефективних коефіцієнтів дифузії.

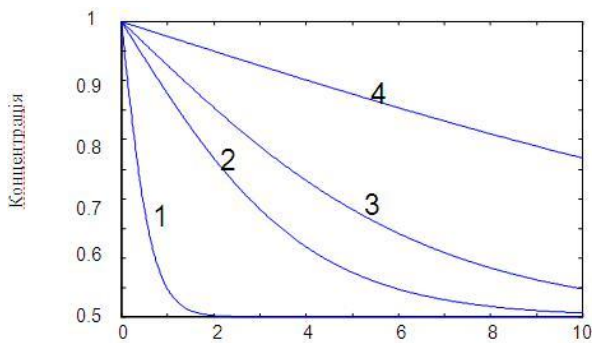


Рисунок 3 – Зміна концентрації на заданій висоті 1,5 м по довжині траси вздовж напрямку руху від джерела викиду на світлофорі за різних ефективних коефіцієнтів дифузії: 1 – $k = 60$; 2 – $k = 100$; 3 – $k = 150$; 4 – $k = 200$

Хоча розрахунки мають чисельно-експериментальний характер, тобто були здійснені за умовних співвідношень амплітуди швидкості віт-

ру і конвективної складової швидкості повітряних мас, порівняння одержаних результатів із відомими дослідними даними [3, 4] дозволяє зробити висновок, що запропонована модель більш достовірно описує якісні особливості поширення домішок, ніж інші методики.

На рисунках 4 і 5 показані графіки залежності безрозмірної концентрації на висоті вимірювання z від безрозмірного комплексу k , розрахованого за допомогою чисельного експерименту з дифузійної моделі вздовж напрямку руху i в напрямку, перпендикулярному до напрямку руху на різній відстані від джерела.

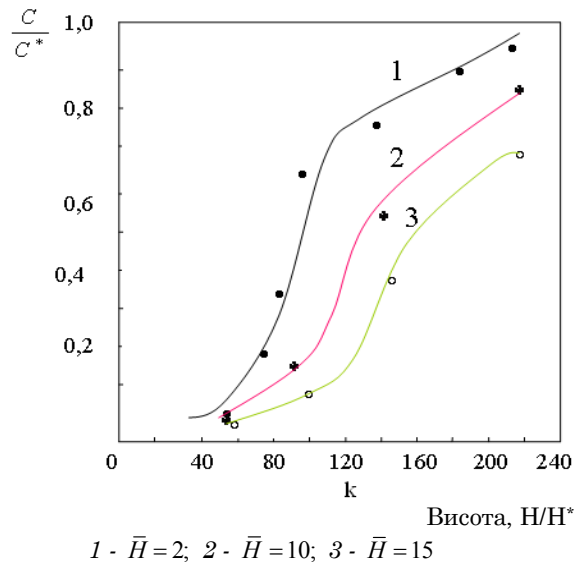


Рисунок 4 – Залежність безрозмірної концентрації на висоті вимірювання $z = 1,5$ м від безрозмірного комплексу k за напрямком руху

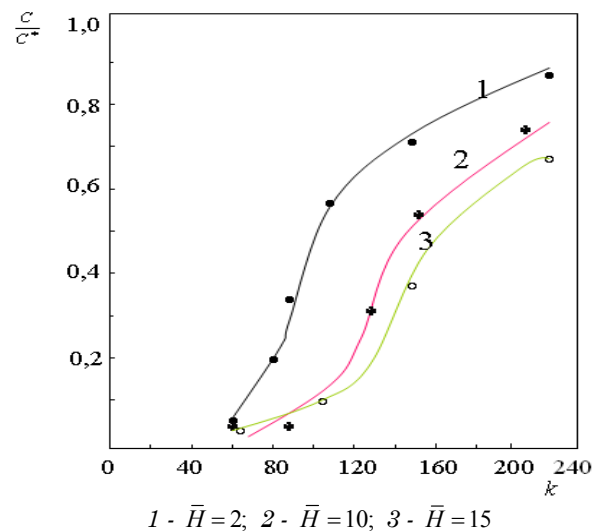


Рисунок 5 – Залежність безрозмірної концентрації на висоті вимірювання $z = 1,5$ м від безрозмірного комплексу k за напрямком, перпендикулярним до напрямку руху

Використовуючи наведені графіки, можна розрахувати коефіцієнти зниження інтенсивності викидів для будь-якої ділянки магістралі. Таким чином,

були визначені коефіцієнти зниження інтенсивності викидів залежно від відстані на перехресті вул. Харківської, вул. Прокоф'єва та просп. М. Лушпи (м. Суми). Відповідні коефіцієнти становлять 0,46 при відстані 260 м та 0,53 – при 200 м (перпендикулярно до напрямку руху), 0,68 – при 130 м (вздовж напрямку руху).

ВИСНОВКИ

Під час розв'язання поставленого завдання було використано підхід, який дозволяє одержати просторове поле концентрації за будь-яких станів атмосфери та швидкості повітряного потоку.

Адекватність запропонованої математичної моделі для оцінювання підтверджують позитивні результати експериментальних досліджень інших авторів [3, 4, 6]. Пропонована модель використовує мінімум експериментальних даних, які досить просто можуть бути одержані при проведенні чисельного експерименту та більш достовірно описує якісні особливості поширення домішок. Перевагою моделі також є те, що вона легка для програмування у прикладних математичних пакетах (MATLAB, Maple та ін.). Тому ця модель може бути рекомендована для практичного використання.

Modelling of the Emission and Concentration Distribution of Vehicles in the Environment

R. A. Vaskin¹⁾, V. O. Solyanyk²⁾, I. V. Vaskina³⁾

1), 2), 3) Sumy State University, 2, Rimsky Korsakov Str., 40007, Sumy, Ukraine

Increasing number of vehicles on the Ukrainian roads requires reliable analysis and forecasting of ecological situation near highways. This issue is devoted to modeling the distribution concentration of emissions from vehicles with different input data. Based on diffusion model was developed a model that allows describing the general background pollution intensity at a given motor flow on the section line, and the changing intensity of emissions under different operating conditions of the engine: during acceleration, braking and stop the vehicle. The article shows the results of calculations of concentration changes depending on the initial concentration of harmful substances, vehicle speed, diffusion coefficient. In the process of solving this problem we used an approach that provides a spatial concentration field in any state of the atmosphere and airflow. The adequacy of the proposed mathematical model for the evaluation confirms the positive results of experimental studies of other authors. The advantages of proposed model are using minimum of experimental data and easy programming in applied mathematical packages.

Keywords: mathematical model, convection, diffusion, intensity, inhibition transport, braking, acceleration.

Моделирование распределения концентрации выбросов от автотранспорта в пространстве

Р. А. Васькин¹⁾, В. О. Соляник²⁾, И. В. Васькина¹⁾

1), 2), 3) Сумский государственный университет, ул. Римского-Корсакова, 2, г. Сумы, Украина, 40007

Рост количества автотранспорта на дорогах Украины вызывает необходимость достоверного анализа и прогноза экологической обстановки вблизи магистралей. Данное исследование посвящено вопросам моделирования распределения концентрации выбросов от автотранспорта при различных исходных данных. На основе диффузионной модели была разработана модель, которая позволяет описать общий фон загрязнения при заданной интенсивности автотранспортного потока на участке магистрали, а также с учетом изменения интенсивности выброса при различных режимах работы двигателя: при разгоне, торможении и остановке автомобиля. В статье приведены результаты расчетов изменения концентрации в зависимости от начальной концентрации вредных веществ, скорости движения автомобиля, коэффициента диффузии. При решении поставленной задачи было использовано подход, позволяющий получить пространственное поле концентрации любого состояния атмосферы и скорости воздушного потока. Также были определены коэффициенты снижения интенсивности выбросов в зависимости от расстояния и направления движения транспорта на конкретном перекрестке. Адекватность предложенной математической модели для оценки подтверждают результаты экспериментальных исследований других авторов. Преимуществами предлагаемой модели является использование минимума экспериментальных данных и легкое программирование в прикладных математических пакетах.

Ключевые слова: математическая модель, конвекция, диффузия, интенсивность, торможение, разгон.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бабков В. С. Анализ математических моделей распространения примесей от точечных источников / В. С. Бабков,

Т. Ю. Ткаченко // Наукові праці ДонНТУ. Серія «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка». – 2011. –

№ 13, – С. 9.

2. Розенберг Г. С. Экологическое прогнозирование (Функциональные предикторы временных рядов) / Г. С. Розенберг, В. К. Шитиков, П. М. Брусиловский. - Тольятти, 1994. - 182 с.
3. Гольдфейн М. Д. Расчетный мониторинг распространения выбросов автомобильного транспорта в крупном промышленном городе / М. Д. Гольдфейн, Н. И. Кожевников, Н. А. Фетисова // Успехи современного естествознания. – 2006. - № 4. – С. 35 - 36.
4. Berlyand M. E. Experimental investigation of atmospheric

pollution due to motor vehicles / M. E. Berlyand, N. S. Burenin, E. L. Genihovich // Proc. Sov. American. Symp on mobile sources of air pollution.– Saint-Petersburg, 1992. – Vol. 1. - P. 105 - 121.

5. The wind field model [Электронный ресурс]. URL: <http://indic-airviro.com>
6. Бызова Н. Л. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примесей / Н. Л. Бызова, Е. Г. Гаргер, В. Н. Иванов. – Л. : Гидрометеос-издат, 1991. – 273 с.

REFERENCES

1. Babkov, V. S., Tkachenko, T. J. (2011). Analiz matematicheskikh modeley rasprostraneniya primesey ot tochechnykh istochnikov [Analysis of mathematical models of the spread of contaminants from point sources], Donetsk, Ukraine.
2. Rozenberg, G. S., Shitikov, V. K., and Brusilovskiy, P. M. (1994). Ekologicheskoe prognozirovanie. Funktsionalnye prediktory vremennykh ryadov [Ecological forecasting. Functional predictors of time series], Tolyati, Russia.
3. Goldfein, M. D., Kogevnikov, N. I., Fetisova, N. A. (2006). Raschetny monitoring rasprostraneniya vybrosov avtomobilnogo transporta v krupnom promyshlennom gorode [Current monitoring of the spread of road transport emissions in large industrial cities], Russia, Moscow.
4. Berlyand M. E., Burenin N. S., Genihovich E. L. Experimental investigation of atmospheric pollution due to motor vehicles. Proc. Sov. American. Symp on mobile sources of air pollution. Vol.1. – Saint-Petersburg. – 1992. – P. 105 - 121.
5. The wind field model [Электронный ресурс]. - URL: <http://indic-airviro.com>
6. Byzova N. L., Garger E. G., Ivanov V. N. (1991). Eksperimentalnye issledovaniya atmosfernoy diffusii i raschety rasseyaniya primesey [Experimental study of atmospheric diffusion and calculations of impurities dispersion], Leningrad. Russia.



Dear authors of our journal!

The editorial board of the “Journal of Engineering Sciences” while choosing articles for publication will pay special attention to their structure (according to the Ruling of the Presidium of Ukrainian State Commission for Academic Degrees and Titles about “The Enhancement of requirements to specialized editions registered in the bases of Ukrainian State Commission for Academic Degrees and Titles ” of 15.01.2003, № 7-05/1). We accept for publication original articles in electronic form by one or several (up to 5 authors) according to main rubrics of the “Journal of Engineering Sciences” Scientific articles should contain the following elements:

- general statement of the issue and its connection with important scientific or practical tasks;
- analysis of the recent investigations and publications which form the base for the decision of the problem and which the author relies on;
- statement of the constituencies of the general problem which were not solved before and which the article deals with;
- statement of the purposes of the article (setting of the task);
- description of the data for study with full justification of scientific results;
- conclusions concerning the investigation and promises of further development in the chosen direction.

All the articles undergo an independent closed reviewing.

For publication in the scientific journal the authors should sent through the web – service of the site electronic versions of the following materials:

- The article (in Russian, Ukrainian or English, 100-200 words).
- The extended summary in English (100-200 words);

ATTENTION! If one of mentioned components is absent, if there are many stylistic, orthographic or grammatical errors, if the article is not formatted according to the requirements, the materials will not be taken into consideration by the Editorial Board and will not be reviewed

Minimum size of the materials:

Scientific – theoretical articles (up to 25 000 symbols, about 14 pages) –deal with theoretical search and description of laws concerning phenomena under study. Theoretical articles form a base for any investigation. Quite often theoretical speculations paved the way to fundamental principles, which later were proved by tests and experiments. There are spheres where theoretical methods are the only way to reveal the nature of the object of study.

Scientific – practical articles (up to 10 000 symbols, about 6 pages) – deal with scientific experiments and real experience. They include descriptions of methods of experimentation or means of observation and recording of the phenomena under study. An essential part of such articles is the description of results and their explanation acquired in the process of immediate contact with the object of study and influence upon it.

Scientific and methodical articles (up to 15 000 symbols, about 8 pages) – deal with the review of processes, methods, instruments allowing to solve scientific and application tasks. Quite often the statement of some new methodology is proceeded by a full – scale scientific work, results of which allow to create a more precise methodology on the basis of newly discovered laws. That is way theses often deal with methodology (mechanism, tool kit, etc.). Articles like that further provide the basis for reference miscellanies.



Інтелектуальна діагностична система для радіонуклідного статичного обстеження

А. С. Рижова¹⁾, В. В. Москаленко²⁾

^{1), 2)} Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, Україна, 40007

Article info:

Paper received:

17 September 2015

The final version of the paper received:

01 December 2015

Paper accepted online:

10 December 2015

Correspondent Author's Address:

²⁾ systemscoders@gmail.com

Пропонується метод інформаційного синтезу вирішальних правил діагностичної системи для радіонуклідного статичного обстеження органів людини на гамма-камері в умовах незбалансованого обсягу навчальних вибірок класів розпізнавання. Розглядається формування вхідного математичного опису діагностичної системи. Розроблено алгоритми сегментації та класифікації сцинтиграфічних зображень на основі інформаційно-екстремального машинного навчання. Розроблені алгоритми ґрунтуються на адаптивному двійковому кодуванні значень ознак розпізнавання та оптимізації геометричних параметрів розбиття простору ознак на класи еквівалентності, контейнери яких відновлюються в радіальному базисі бінарного простору Хеммінга, в процесі максимізації інформаційної спроможності діагностичної системи. Як критерій функціональної ефективності діагностичної системи використано модифікацію інформаційного критерію за С. Кульбаком, що є функціоналом від першої та другої достовірностей рішень, що приймаються в робочому режимі системи. Як приклад реалізації запропонованих алгоритмів розглядається паралельна композиція інформаційно-екстремальних класифікаторів для оцінювання рівня ураження паренхіми нирок внаслідок інфекційних захворювань.

Ключові слова: сегментація зображень, класифікація, машинне навчання, інформаційний критерій, оптимізація, словник ознак, радіонуклідна діагностика, гамма-камера.

ВСТУП

Радіонуклідна діагностика призначена для розпізнавання патологічних процесів в органах і тканинах шляхом введення пацієнтові радіофармпрепарату та реєстрації гамма-квантів, що випромінюються ним. Основним пристроєм для проведення сцинтиграфічних досліджень є гамма-камера, яка може зафіксувати кінцевий розподіл радіофармпрепарату у вигляді статичного знімка або зібрати серію зображень з певним часовим кроком для відображення динаміки накопичення та виведення радіофармпрепарату [1]. При цьому статичне обстеження є одним із найбільш інформативних досліджень при ранній діагностиці патологій нирок, рецидивів та метастазів пухлин. Однак інтерпретація сцинтиграфічних зображень (сцинтиграм) часто викликає у лікаря-діагноста певні труднощі. Це пов'язано з тим, що сцинтиграми є складним типом напівтонових зображень, для яких характерні наявність шуму, зерен і плям, слабка контрастність та відсутність стабільних відмінностей окремих областей [2, 3]. Обробка цих даних є складною процедурою, в якій забезпечення високої достовірності діагностичного висновку потребує об'єднання колективних знань експертів. Тому застосування ідей і методів машинного навчання та розпізнавання образів є одним з перспективних підходів для обробки сцинтиграм [4].

Такий підхід передбачає синтез вирішальних правил на основі навчальної матриці, що об'єднує колективний досвід експертів, і дозволяє реалізувати автоматичну сегментацію та класифікацію зображень з метою формування високодостовірного діагностичного висновку. Як показано у працях [4, 5] популярні методи машинного навчання такі, як машина опорних векторів, нейронні мережі, та класифікатор Байеса, не забезпечують високої достовірності діагностичних рішень, оскільки в практичних умовах обмеженого та незбалансованого обсягу навчальних вибірок вони ігнорують перетин класів у просторі ознак розпізнавання.

Мета статті – запропонувати метод інформаційного синтезу здатної навчатися діагностичної системи для радіонуклідного статичного обстеження нирок з метою визначення ступеня їх ураження в умовах обмеженого і незбалансованого набору навчальних даних.

ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Нехай на основі множини статичних сцинтиграфічних зображень із виділеними областями нирки і її уражень (у випадку їх наявності) та відповідних експертних висновків сформовано апріорно класифіковану вибірку векторів ознак пікселя в зоні спосте-

реження $\{v_{i,k}^{\theta} \mid j = \overline{1, n}; i = \overline{1, N}, k = \overline{1, K}\}$ та алфавіт класів $\{T_k^o \mid k = \overline{1, K}\}$, що характеризує тип зони спостереження. При цьому клас T_1^o є базовим і відповідає зоні інтересу. Для зони інтересу задано алфавіт образів $\{\Phi_c^o \mid c = \overline{1, C}\}$, що характеризує ступінь ураження нирки, і відповідна апріорно класифікована вибірка векторів ознак контурів нирки та її уражень $\{y_{c,i}^{\theta} \mid j = \overline{1, n_c}; i = \overline{1, N}; c = \overline{1, C}\}$. Клас Φ_1^o є базовим і відповідає функціональному стану здорової нирки. Відома структура вектора параметрів функціонування діагностичної системи:

$$g = \langle w, \delta_{T,i}, \delta_{\Phi,i}, x_m, d_m \rangle, \quad (1)$$

де w – розмір вікна (в пікселях) при скануванні сцинтиграфічного зображення; $\delta_{T,i}, \delta_{\Phi,i}$ – параметри ширини поля контрольних допусків для i -ї ознаки класифікаторів зони спостереження та функціонального стану нирки відповідно; x_m – двійковий еталонний вектор класу $X_m^o \in \{T_k^o\} \cup \{\Phi_c^o\}$, що визначає геометричний центр його гіперсферичного контейнера; d_m – радіус контейнера класу $X_m^o \in \{T_k^o\} \cup \{\Phi_c^o\}$, що побудований у радіальному базисі бінарного простору ознак.

При цьому задано такі обмеження: $d(x_m \oplus x_{cm}) > d_m$, де $d(x_m \oplus x_{cm})$ – кодова відстань між двійковим еталонним (усередненим) вектором класу X_m^o та двійковим еталонним вектором сусіднього до нього класу X_{cm}^o ; $\delta_{T,i} \in [0; \delta_{\max}]$, $\delta_{\Phi,i} \in [0; \delta_{\max}]$.

Необхідно в процесі навчання діагностичної системи визначити оптимальні значення координат вектора параметрів функціонування g^* (1), що забезпечують максимальне значення усередненого за алфавітом класів розпізнавання інформаційного критерію функціональної ефективності (КФЕ) навчання діагностичної системи:

$$\bar{E} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \max_{\sigma_E} \{E_m\}. \quad (2)$$

Необхідно в робочому режимі діагностичної системи прийняти рішення про належність екзаменаційних реалізацій до одного з класів алфавіту зон спостереження $\{T_k^o\}$ та про відповідність екзаменаційних реалізацій, віднесених до зони інтересу T_1^o , одному з класів алфавіту функціональних станів нирки $\{\Phi_c^o\}$.

АЛГОРИТМ ФУНКЦІОНУВАННЯ ДІАГНОСТИЧНОЇ СИСТЕМИ

Першим етапом аналізу сцинтиграфічного зображення є сегментація з метою виділення зон інтересу – межі нирок та їх уражень. Для розв'язання задачі сегментації сцинтиграфічних зображень за-

пропоновано здійснювати класифікацію їх пікселів на основі вирішальних правил, синтезованих у процесі інформаційно-екстремального машинного навчання [6]. При цьому вектор ознак пікселя може включати як координати та яскравість цього пікселя і його околу, так і відстань до різних анатомічних структур, інформацію про симетрію та інші ознаки. Визначення розміру сканувального вікна при класифікаційній сегментації можна виконати у зовнішньому контурі оптимізації параметрів навчання діагностичної системи. Розмітку (ручну сегментацію) навчальних зображень здійснюють різні експерти з радіонуклідної діагностики нирок.

До початку етапу сегментації доцільно виконати фільтрацію від різного типу шумів. Найбільш загальним нелінійним фільтром є медіанний, який замінює інтенсивність кожного пікселя зображення медіанним значенням інтенсивності пікселів його околу. Проте застосування медіанного фільтра призводить до придушення верхніх просторових частот зображення, викликаючи розмиття країв, що несуть інформацію про морфологічні особливості діагностованих органів. При цьому області сцинтиграфічного зображення з більшими значеннями лічильника імпульсів мають більше значення відношення сигнал/шум і тому потребують меншого рівня згладжування порівняно з тими областями, де інтенсивність імпульсів менша. Тому розмір вікна фільтра, який визначає рівень згладжування, потрібно адаптувати до рівня і типу шуму. Розглянемо основні кроки відповідної реалізації адаптивної медіанної фільтрації статичних сцинтиграм [7].

1. Формуємо для пікселя з координатами (x, y) вікно Wxy розміром Sxy .

2. Для вікна Wxy обчислюємо різниці:

$$A1 := Z_{\text{med}} - Z_{\text{min}},$$

$$A2 := Z_{\text{med}} - Z_{\text{max}},$$

де Z_{med} – медіана інтенсивності пікселів у вікні Wxy ;

Z_{max} – максимальний рівень інтенсивності пікселів у вікні Wxy ;

Z_{min} – мінімальний рівень інтенсивності пікселів у вікні Wxy .

3. Якщо $A1 > 0$ та $A2 < 0$, то перехід до кроку 5, інакше збільшити вікно.

4. Якщо $Sxy < S_{\text{max}}$, де S_{max} – максимальне значення розміру вікна, то перехід до кроку 2.

5. Для вікна Wxy з поточним розміром Sxy обчислюємо різниці:

$$B1 := Z_{xy} - Z_{\text{min}},$$

$$B2 := Z_{xy} - Z_{\text{max}}.$$

6. Якщо $B1 > 0$ та $B2 < 0$, то залишаємо Z_{xy} незмінним, інакше $Z_{xy} := Z_{\text{med}}$, де Z_{med} – медіанне значення інтенсивності пікселів вікна Wxy з поточним розміром Sxy .

У цьому алгоритмі фільтрації підлягає лише той центральний елемент вікна, для якого значення медіани і значення сигналу в центрі вікна більші від мінімального і менші від максимального значень у цьому вікні. При цьому розмір вікна буде більший у фонових ділянках сцинтиграми. Застосування такого фільтра дозволяє видалити біполярну імпульсну заваду, забезпечує згладжування шумів і зменшує

придушення верхніх просторових частот на зображенні.

Для синтезу класифікатора ступенів ураження нирок у процесі інформаційно-екстремального навчання запропоновано попереднє формування ознак розпізнавання в процесі контурного аналізу сегментів нирок та їх уражень. Визначення контурів на сегментованому напівтоновому зображенні починається з виділення меж, тобто кривих на зображенні, вздовж яких відбувається різка зміна яскравості чи інших видів неоднорідності. Один із найбільш популярних методів виділення меж на очищених від шуму зображеннях реалізовано в алгоритмі Кенні (Canny) [8], де використовується фільтр на основі першої похідної від гаусіани. Щоб оперувати з одержаними контурами їх необхідно якимось чином закодувати, наприклад, зазначати вершини відрізків, що складають контур. У праці [9] запропоновано алгоритм топологічного структурного аналізу бінарних зображень, що здатний знаходити зовнішні та вкладені контури і визначати їх ієрархію вкладеності. Цей алгоритм реалізовано в безкоштовній бібліотеці машинного зору *opencv* [10]. Бібліотека містить функції апроксимації точок ламаними лініями, прямокутниками, колами чи еліпсами. Також присутні функції для обчислення довжини контурів в пікселях, чи площі контурів у пікселях квадратних. Це дозволяє реалізувати фільтрацію контурів малої площі, які не становлять інтересу для лікаря-діагноста.

Після поєднання результатів сегментації та контурного аналізу пропонується формувати такий словник ознак:

- 1) мінімальна відстань між контуром ураження та контуром нирки;
- 2) велика і мала півосі еліпса ураження;
- 3) відносна площа ураження;
- 4) відношення сумарної яскравості нирки до її відносної площі;
- 5) координата x центра ваги контуру ураження;
- 6) координата y центра ваги контуру ураження;
- 7) ексцентриситет еліпса, одержаного за апроксимації контуру ураження;
- 8) вік пацієнта;
- 9) абсолютна площа нирки;
- 10) довжина нирки, при її апроксимації прямокутником;
- 11) ширина нирки;
- 12) відношення сумарних яскравостей лівої та правої нирок;
- 13) пропорція уражень, які виходять за чотири середньоквадратичних відхилень у базі навчальних зразків нормального стану нирки.

Інформаційно-екстремальне машинне навчання полягає у трансформації апріорно нечіткого простору первинних ознак розпізнавання в чітку еквівалентність класів, контейнери яких відновлюються в радіальному базисі двійкового простору вторинних ознак (простір Хеммінга).

Алгоритм інформаційно-екстремального навчання діагностичної системи подається як двоциклічна ітераційна процедура пошуку глобального максимуму інформаційного КФЕ (2) у робочій (допустимій) області визначення його функції

$$\overline{E}_m^* = \max_{G_\delta} \left\{ \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \max_{\{d_m\} \in G_{d_m}} \{E_m\} \right\}, \quad (3)$$

де G_δ – допустима область значень параметра поля контрольних допусків δ ; G_E – робоча область визначення функції критерію \overline{E} ; $G_d \in [0; d(x_m \oplus x_c) - 1]$ – область допустимих значень параметра d_m , що обмежена міжцентровою кодовою відстанню $d(x_m \oplus x_c)$ до найближчого сусіднього кластера (класу) X_c^o .

Розглянемо реалізацію алгоритму інформаційно-екстремального навчання [6, 11], що реалізує найпростішу процедуру оптимізації меж нижнього $A_{H,i}$ та верхнього $A_{B,i}$ поля контрольних допусків для i -ї ознаки з подальшою послідовною оптимізацією геометричних параметрів розбиття простору ознак.

1) обнулення лічильника кроків зміни параметра рецептивного поля $\delta : l := 0$;

2) $l := l + 1$;

3) на кожному кроці зміни параметра рецептивного поля обчислюються нижня $A_{H,i}[l]$ та верхня $A_{B,i}[l]$ межі кодувального рецептивного поля для всіх ознак розпізнавання за формулами

$$A_{H,i}[l] = y_{1,i} - \delta[l]; \quad A_{B,i}[l] = y_{1,i} + \delta[l], \quad (4)$$

де $y_{1,i}$ – вибіркове середнє значення i -ї ознаки в навчальній матриці класу X_1^o ;

4) формується бінарна навчальна матриця $\|x_{m,i}^{(j)}\|$ за правилами:

$$x_{m,2^*i-1}^{(j)} = \begin{cases} 1, & \text{if } A_{H_i}[l] < y_{m,i}^{(j)} < A_{B_i}[l], \\ 1, & \text{if } y_{m,i}^{(j)} \geq A_{B_i}[l], \\ 0, & \text{if } y_{m,i}^{(j)} \leq A_{H_i}[l]; \end{cases}$$

$$x_{m,2^*i}^{(j)} = \begin{cases} 1, & \text{if } A_{H_i}[l] < y_{m,i}^{(j)} < A_{B_i}[l], \\ 0, & \text{if } y_{m,i}^{(j)} \geq A_{B_i}[l], \\ 1, & \text{if } y_{m,i}^{(j)} \leq A_{H_i}[l]; \end{cases}$$

5) для класу X_m^o обчислюється двійковий еталонний вектор x_m за правилом

$$x_{m,i} = \begin{cases} 1, & \text{if } \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{m,i}^{(j)} > 0,5, \\ 0, & \text{if } \text{else}; \end{cases}$$

6) для множини векторів $\{x_m\}$ формується структурована множина елементів попарного розбиття $\{\mathcal{R}_m^2 = \langle x_m, x_c \rangle\}$, що задає план навчання. Тут x_c – еталонний вектор найближчого класу X_c^o .

7) обчислюється для кожного класу X_m^o значення інформаційного КФЕ навчання діагностичної системи [6]:

$$E_m = [D_{1,m} + D_{2,m} - 1]^* \log_2 \left(\frac{D_{1,m} + D_{2,m}}{2 - [D_{1,m} + D_{2,m}]} \right), \quad (5)$$

де $D_{1,m}$ – перша достовірність для класу X_m^o ;
 $D_{2,m}$ – друга достовірність;

8) обчислюється за формулами (1) і (3) усереднене значення критерію $\bar{E}[l]$;

9) якщо $\delta \leq \delta_{\max}$, то виконується пункт 2, інакше – пункт 10;

$$10) \bar{E}^*[l] := \max_{\{l\}} \bar{E}[l];$$

$$11) \delta^* := \arg \bar{E}^*[l];$$

12) для параметра δ^* обчислюються за формулами (4) оптимальні нижні $\{A_{H,i}^*\}$ і верхні $\{A_{B,i}^*\}$ межі поля контрольних допусків на ознаки розпізнавання;

13) визначаються оптимальні радіуси контейнерів класів розпізнавання:

$$d_m^* = \arg E_m^*[\delta^*],$$

де $E_m^*[\delta^*]$ – максимальне значення КФЕ навчання діагностичної системи розпізнавати реалізації класу X_m^o , обчислене при оптимальному параметрі поля допусків δ^* ;

14) ЗУПИН.

Робоча (допустима) область визначення функції інформаційного критерію обмежена нерівностями $D_{1,m} \geq 0,5$, $D_{2,m} \geq 0,5$.

Для зручності порівняння результатів машинного навчання в рамках інформаційно-екстремальної інтелектуальної технології використовують нормовану модифікацію критерію (5), яку подають у вигляді

$$E_m^{(k)'} = \frac{E_m^{(k)}}{E_{\max}}, \quad (6)$$

де E_{\max} – максимальне граничне значення критерію (3), обчислене при: $D_{1,m}^{(k)} = 1$ та $\beta_m^{(k)} = 0$.

Накопичені в процесі медичної діагностики дані часто мають великий обсяг зі значною незбалансованістю класів, що обмежує застосування більшості методів машинного навчання. Однією з простих технік врахування незбалансованості є збільшення «премій» за правильну і збільшення «штрафів» за помилкову класифікацію реалізацій меноритарних класів [12]. Це збільшує чутливість до рідкісних подій (наприклад, рідкісні захворювання чи аномальні функціональні стани діагностованого органа і т. д.), розпізнавання яких має більшу цінність, однак одночасно зменшується сумарна точність розпізнавання. Для підвищення точності класифікації реалізацій незбалансованих класів розпізнавання також застосовують методи послідовної (boosting) чи пара-

лельної (bagging) композиції ансамблю класифікаторів, що навчаються на різних підвбірках. Розмір одержуваної композиції класифікаторів залежить від використовуюваного методу машинного навчання. Перевагою поєднання ІЕІ-технології з методом паралельної композиції класифікаторів є можливість реалізації розпаралеленого, зокрема розподіленого, навчання та екзамену з підвищеною точністю за алгоритмом із відносно невисокою обчислювальною складністю, що сприяє зростанню загальної оперативності системи.

Кожен базовий класифікатор використовує один і той самий алгоритм, проте навчається за різними даними. Прогноз у композиції класифікаторів здійснюється шляхом комбінування результатів прогнозу кожного окремого класифікатора за допомогою зваженого голосування – прогнозованим класом є той клас, за який «проголосувало» більшість базових класифікаторів.

Алгоритм екзамену окремого класифікатора ґрунтується на аналізі значень функції належності, яка обчислюється для кожної реалізації, що розпізнається, визначаючи належність до контейнера класу X_m^o . Функція належності має геометричний сенс і обчислюється за формулою

$$\mu_m = 1 - \frac{d(x_m^* \oplus x^{(j)})}{d_m^*},$$

де $d(x_m^* \oplus x^{(j)})$ – кодова відстань між еталонним вектором x_m^* і реалізацією класу, що розпізнається; d_m^* – оптимальний радіус контейнера класу X_m^o .

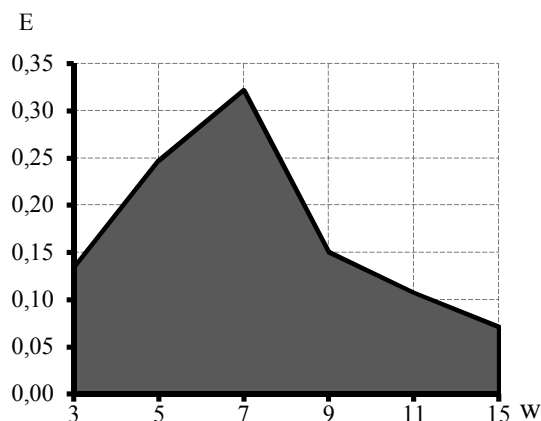
Таким чином, навчання діагностичної системи полягає в оптимізації параметрів композиції класифікаторів на етапах сегментації та формування діагностичного висновку в процесі пошуку глобального максимуму інформаційного критерію в робочій області визначення його функції.

РЕЗУЛЬТАТИ ФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

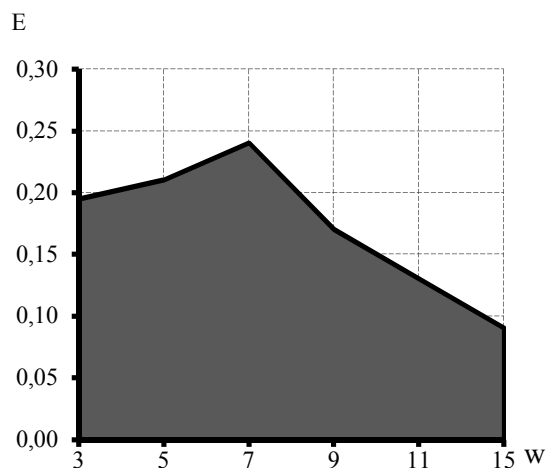
Розглянемо результати реалізації запропонованих алгоритмів на прикладі навчання діагностичної системи для статичних нефросцинтиграфічних досліджень. Вибіркові дані складаються із сцинтиграфічних зображень, що зберігаються в репозиторії медичних зображень кластерного комплексу в Інституті сцинтиляційних матеріалів НАН України і подані у форматі DICOM. Для кожного із зображень медичними експертами сформовано діагностичний висновок про ступінь ураження в балах і додатково сформовано маски, що виділяють область нирок та області уражень перенхіми внаслідок інфекційних захворювань сечової системи. У цьому дослідженні алфавіт діагностичного висновку має два класи розпізнавання, що характеризують ступінь ураження за системою якісних оцінок Φ_1^o – «НОРМА» та Φ_2^o – «АНОМАЛІЯ». При цьому для класу Φ_1^o зібрано 1 050 зображень, а для класу Φ_2^o – 125 зображень.

На рисунку 1 показано графіки залежності усередненого нормованого інформаційного КФЕ від розміру сканувального вікна при класифікаційній

сегментації. При цьому для балансування класів міноритарний клас доповнювався дублікатами векторів-реалізацій. Штрихована ділянка позначає (тут і далі) робочу область визначення інформаційного КФЕ.



а



б

Рисунок 1 - Залежність усередненого значення КФЕ (6) класифікатора при сегментації: а – нирок; б – уражень

Аналіз рис. 1 показує, що оптимальний розмір вікна для виділення сегмента нирки становить 7×7 пікселів, для виділення сегментів уражень оптимальний розмір вікна становить теж 7×7 пікселів. При цьому максимум усередненого нормованого інформаційного КФЕ при сегментації області нирки становить $E^* = 0,321$. Максимум усередненого нормованого інформаційного КФЕ при сегментації областей ураження становить $E^* = 0,242$. Тобто інформаційний критерій на етапі сегментації не досягає свого граничного значення. На рисунку 2 показано процес оптимізації меж полів контрольних допусків за процедурою (3), за якої значення параметра полів контрольних допусків змінюється для всіх ознак одночасно. Пунктирна лінія (тут і далі) позначає зміну значень точності класифікатора на повному наборі апріорно класифікованих даних із незбалансованими класами. Точність A виражається відношенням

кількості правильно класифікованих спостережень до їх загальної кількості.

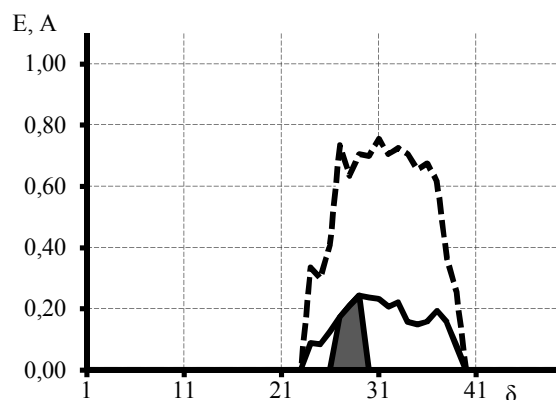


Рисунок 2 - Залежність усередненого КФЕ (6) і точності класифікації пікселів від параметра поля контрольних допусків на ознаки розпізнавання

Аналіз рис. 2 показує, що оптимальне значення поля контрольних допусків при сегментації області уражень становить $\delta^* = 29$ при значенні усередненого нормованого критерію (6) $E^* = 0,242$.

На рисунку 3 показано залежність усередненого нормованого критерію (6) та точності класифікації пікселів від кількості базових класифікаторів, що беруть участь у паралельній композиції. При цьому випадкові вибірки реалізацій для кожного з класів будь-якого базового класифікатора становить $n = 100$.

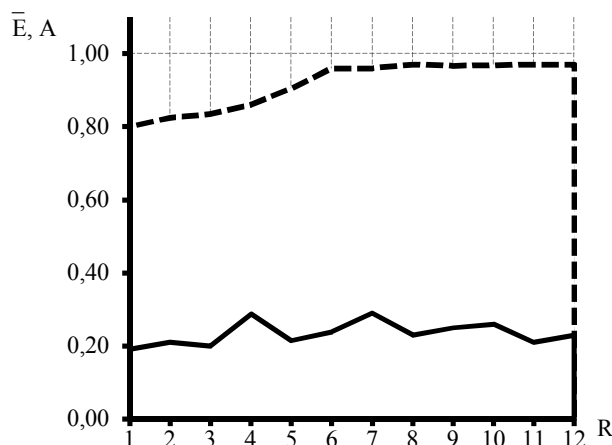


Рисунок 3 - Залежність усередненого КФЕ (6) та точності класифікації від кількості класифікаторів при сегментації

Аналіз рис. 3 показує, що при збільшенні кількості базових класифікаторів, які беруть участь у паралельній композиції рішень, точність сегментації всіх доступних зображень спочатку має тенденцію до підвищення, але при кількості класифікаторів більшій ніж 6 точність істотно не змінюється. При цьому середнє значення КФЕ (6) навчання базових класифікаторів коливається в діапазоні $0,191 \dots 0,293$.

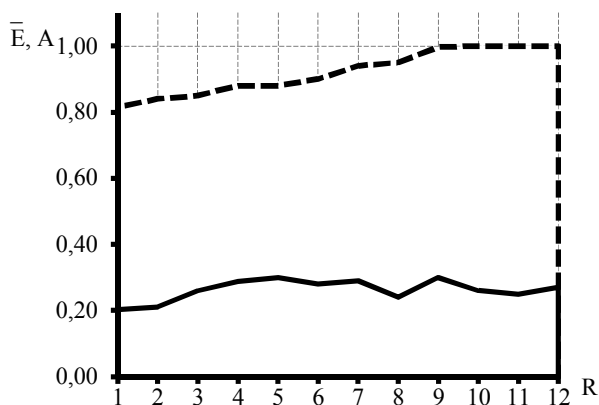


Рисунок 4 - Залежність середнього значення КФЕ (\bar{E}) та точності класифікації від кількості класифікаторів під час оцінювання ступеня ураження нирки

На рисунку 4 показано залежність усередненого нормованого критерію (\bar{E}) та точності розпізнавання рівня ураження паренхіми від кількості базових класифікаторів, що беруть участь у паралельній композиції вирішальних правил.

Аналіз рис. 4 показує, що точність оцінювання ступеню ураження паренхіми спочатку збільшується, а за кількості класифікаторів більшої ніж 9 точність істотно не змінюється. При цьому середнє значення КФЕ (\bar{E}) навчання базових класифікаторів коливається в діапазоні 0,202...0,301.

На рисунку 5 на прикладі одного зображення лівої нирки проілюстровано етап експертної розмітки зображення та етапи автоматичної сегментації і виділення контурів уражень за оптимальних параметрів функціонування діагностичної системи.

Аналіз рис. 5 показує, що за оптимальних параметрів функціонування діагностичної системи результат сегментації дещо відрізняється від експертної розмітки, проте аналіз рис. 4 показує, що неточність сегментації не погіршила точності медичного висновку щодо ступеня ураження нирки.

Таким чином, у результаті машинного навчання композиції базових інформаційно-екстремальних класифікаторів вдалося синтезувати безпомилкові за навчальною матрицею вирішальні правила в умовах перетину в просторі ознак та незбалансованості класів розпізнавання.

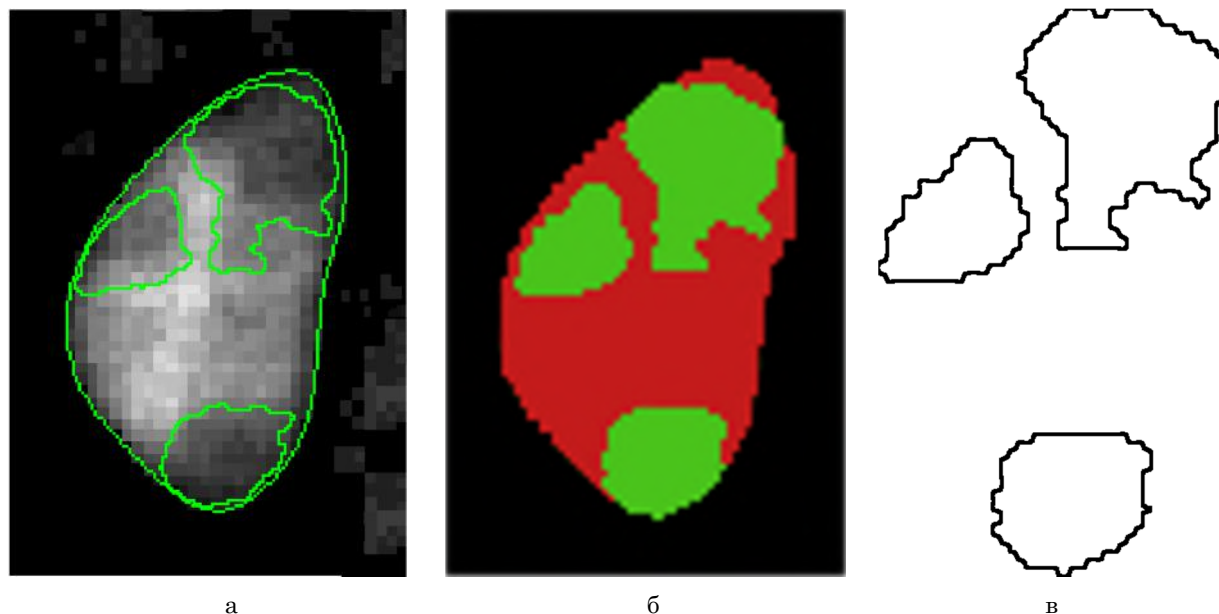


Рисунок 5 - Результати етапів обробки зображення після фільтрації: а – експертна розмітка; б – автоматична сегментація; в – виділення контурів

ВИСНОВКИ

Отже, розроблений інформаційно-екстремальний алгоритм сегментації сцинтиграм статичного радіонуклідного дослідження дозволяє реалізувати автоматичне виділення зон інтересу за оптимальними в інформаційному сенсі вирішальними правилами. При цьому вдалося синтезувати безпомилкові за навчальною матрицею вирішальні правила для класифікації ступеня ураження паренхіми нирок в умовах обмежених за обсягом навчальних вибірок та перетину класів у просторі ознак.

Результати фізичного моделювання підтверджують високу ефективність одержаних вирішальних правил у режимах сегментації та класифікації медичних зображень. Практична цінність одержаних результатів для комп'ютеризованої медицини полягає у формуванні сучасної науково-методологічної основи проектування здатних навчатися діагностичних систем для статичного обстеження на гамма-камері.

Intelligent Diagnostic System For Static Radionuclide Examination

A. S. Rizhova¹⁾, V. V. Moskalenko²⁾

^{1), 2)} *Sumy State University, 2, Rimsky Korsakov Str., 40007, Sumy, Ukraine*

The article presents the method of an informational synthesis of decision rules for radionuclide diagnostic system of static examination of the human on gamma camera in case of unbalanced training dataset. The making of input mathematical description for intelligent radionuclide diagnostic system is considered. The algorithms for segmentation and classification scintigraphy images based on information-extreme machine learning are developed. The algorithms are based on adaptive binary coding of feature vectors and optimization of geometrical parameters of feature space partition into classes with containers which build into a radial basis of binary Hamming space to maximize the information ability of system intended to radionuclide diagnostics. The modified S. Kulback's information criterion for estimate efficiency of diagnostic system is expressed in terms of positive and negative predictive value. The physical modeling of proposed algorithms is implemented by the example of bootstrap aggregating information-extreme classifiers intended to estimation of level of kidney lesion.

Keywords: image segmentation, classification, machine learning, information criterion, optimization, feature set, radionuclide diagnostics, gamma camera.

Интеллектуальная система диагностики для радионуклидного статического обследования

А. С. Рыжова¹⁾, В. В. Москаленко²⁾

^{1), 2)} *Сумский государственный университет, ул. Римского-Корсакова, 2, Сумы, Украина, 40007*

Предлагается метод информационного синтеза решающих правил диагностической системы для радионуклидного статического обследования органов человека на гамма-камере в условиях несбалансированного объема обучающих выборок классов распознавания. Рассматривается формирование входного математического описания диагностической системы. Разработаны алгоритмы сегментации и классификации скintiграфических изображений на основе информационно-экстремального машинного обучения. Разработанные алгоритмы основываются на адаптивном двоичном кодировании значений признаков распознавания и оптимизации геометрических параметров разбиения пространства признаков на классы эквивалентности, контейнеры которых восстанавливаются в радиальном базисе бинарного пространства Хэмминга, в процессе максимизации информационной способности диагностической системы. В качестве критерия функциональной эффективности диагностической системы использовано модификацию информационного критерия по С. Кульбаку в виде функционала от первой и второй достоверностей решений, принимаемых в рабочем режиме системы. В качестве примера реализации предложенных алгоритмов рассматривается параллельная композиция информационно-экстремальных классификаторов для оценки уровня поражения паренхимы почек инфекционными заболеваниями.

Ключевые слова: сегментация изображений, классификация, машинное обучение, информационный критерий, оптимизация, словарь признаков, радионуклидная диагностика, гамма-камера.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гектин А. В. Сцинтилляционные материалы. Получение, свойства, применение / А. В. Гектин, А. В. Демин, В. Ю. Педаш. – Харьков : Институт монокристаллов, 2007. – 416 с.
2. Нікілов М. О. Комп'ютерний аналіз кількості функціонуючої паренхіми нирок за даними нефросцинтиграфії з ^{99m}Tc-ДМСО / М. О. Нікілов, Д. О. Супрунюк, А. Л. Каміньська та ін. // Український радіологічний журнал. – 2014. – Т. 22, № 3. – С. 98 - 101.
3. Mohamed Y. Enhancement of Nuclear Medicine Images using Filtering Technique / Y. Mohamed, Y. Abdallah, E. Wagiallah // International Journal of Science and Research. – 2014. – Vol. 3, Issue 8. – P. 916 - 921.
4. Landgren M. An Automated System for Analysis of Renal Scintigraphy Images / M. Landgren, K. Sjostrand, L. Edenbrandt // European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging. – 2011. – P. 489 - 500.
5. Gonzalez F. A. Biomedical Image Analysis and Machine Learning Technologies: Applications and Techniques / F. A. Gonzalez, E. Romero. – Hershey, PA, USA : IGI, 2009. – 390 p.
6. Moskalenko V. V. Information-Extreme Algorithm for Optimizing Parameters of Hyperellipsoidal Containers of Recognition Classes / A.S. Dovbysh, N.N. Budnyk, V.V. Moskalenko // Journal of automation and information sciences. – 2012. – Vol. 44, I.10. – P. 35-44.
7. Shrestha S. Image denoising using new adaptive based median filter / S. Shrestha // Signal & Image Processing : An International Journal. – 2014. – Vol. 5, No 4. – P. 1-13.
8. Zhou P. An Improved Adaptive Threshold Canny Edge Detection Algorithm / P. Zhou, W. Ye, Y. Xia, Q. Wang // Journal of Computational Information Systems. – 2011. – P. 1516-1523.
9. Suzuki S. Topological Structural Analysis of Digitized Binary Images by Border Following / S. Suzuki, K. Abe // Computer vision, graphics, and image processing. – 1985. – N 30. – P. 32-46.
10. Сайт бібліотеки машинного зору [Електронний ресурс].

– Режим доступу : <http://opencv.org/>.

11. Москаленко В. В. Інформаційно-екстремальне машинне навчання за незбалансованими даними великого розміру / В. В. Москаленко // Біоніка інтелекту. – 2015. – № 1 (84). – С. 34-39.

12. Yap B. W. An Application of Oversampling, Undersampling, Bagging and Boosting in Handling

REFERENCES

1. Gektin A. V., Demin A. V., & Pedash V. Ju. (2007). Scintillacionnye materialy. Poluchenie, svojstva, primeneniye [Scintillation materials. Obtaining, properties and application]. Har'kov: Institut monokristallov. [in Russian].
2. Nikolov M. O., Suprunjuk D. O., Kamins'ka A. L., Chizhevs'kij V. B., & Makarenko A. V. (2014). Komp'yuternij analiz kil'kosti funkcionujuchoi parenhimi nirok za danimi nefroscintigracii z 99mTc-DMSO [Computer analysis of the number of functioning renal parenchyma according to the neuroscientifically data with 99mTc-DMSO]. Ukrains'kij radiologichnij zhurnal – Ukrainian Journal of Radiology, 22, 3, 98-101. [in Ukraine].
3. Mohamed Y., Abdallah Y., Wagiallah E. (2014). Enhancement of Nuclear Medicine Images using Filtering Technique. International Journal of Science and Research, 3, 8, 916-921.
4. Landgren M., Sjostrand K., Edenbrandt L. (2011). An Automated System for Analysis of Renal Scintigraphy Images. European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging, 489–500.
5. Gonzalez F. A., & Romero E. (2009). Biomedical Image Analysis and Machine Learning Technologies: Applications and Techniques. IGI Global.
6. Moskalenko V. V., Dovbysh A. S., & Budnyk N. N. (2012). Information-Extreme Algorithm for Optimizing Parameters of Hyperellipsoidal Containers of Recognition Classes. Journal of

Imbalanced Datasets / B. W. Yap, K. A. Rani et al. // Proceedings of the First International Conference on Advanced Data and Information Engineering. Lecture Notes in Electrical Engineering. – 2014. – Vol. 285. – Singapore : Springer Science. – P. 13-22.

automation and information sciences, 44, 35-44.

7. Shrestha S. (2014). Image denoising using new adaptive based median filter. Signal & Image Processing: An International Journal, 5, 4, 1-13.

8. Zhou P., Ye W., Xia Y., & Wang Q. (2011). An Improved Adaptive Threshold Canny Edge Detection Algorithm. Journal of Computational Information Systems, 75, 1516-1523.

9. Suzuki S., Abe K. (1985). Topological Structural Analysis of Digitized Binary Images by Border Following. Computer vision, graphics, and image processing, 30,1, 32-46.

10. Sait byblyoteki mashynogo zoru opencv.org. Retrieved from <http://opencv.org/>. [in Ukraine].

11. Moskalenko V. V. (2015) Informacijno-ekstremal'ne mashinne navchannja za nezbilansovanymi danimi velikogo rozmiru [Information-extreme machine learning for unbalanced big data]. Bionika intelektu – Bionics of Intelligence, 1 (84), 34-39. [in Ukraine].

12. Yap B. W., Rani K. A., Rahman H. A. A., Fong S., Khairudin Z., & Abdullah N. N. (2014). An Application of Oversampling, Undersampling, Bagging and Boosting in Handling Imbalanced Datasets. Proceedings of the First International Conference on Advanced Data and Information Engineering: Lecture Notes in Electrical Engineering. (pp. 13-22).

УГОДА ПРО ПЕРЕДАЧУ АВТОРСЬКИХ ПРАВ

Ми, автор (автори) рукопису статті, що публікується в «Журналі інженерних наук», у разі її прийняття до опублікування передаємо засновникам та редколегії «Журналу інженерних наук» права на:

- публікацію цієї статті українською (російською, англійською) мовою та розповсюдження її друкованої версії;
- переклад статті англійською мовою (для статей українською або російською мовою) та розповсюдження друкованої версії перекладу;
- розповсюдження електронної версії статті, а також електронної версії англійського перекладу статті (для статей українською або російською мовою) через **будь-які** електронні засоби (розміщення на офіційному web-сайті журналу, в електронних базах даних, репозитаріях тощо).

При цьому зберігаємо за собою право **без узгодження** з редколегією та засновниками:

- використовувати матеріали статті повністю або частково з освітньою метою;
- використовувати матеріали статті повністю або частково для написання власних дисертацій;
- використовувати матеріали статті для підготовки тез, доповідей конференцій, а також усних презентацій;
- розміщувати електронні копії статті (у тому числі кінцеву електронну версію, завантажену з офіційного web-сайта журналу) на:
 - a) **персональних** web-ресурсах усіх авторів (web-сайти, web-сторінки, блоги тощо);
 - b) web-ресурсах установ, де працюють автори (включно з електронними інституційними репозитаріями);
 - c) **некомерційних** web-ресурсах відкритого доступу (наприклад, arXiv.org).

В усіх випадках наявність бібліографічного посилання на статтю або гіперпосилання на її електронну копію на офіційному web-сайті журналу є **обов'язковою**.

Цією угодою ми також засвідчуємо, що поданий рукопис:

- не порушує авторських прав інших осіб або організацій;
- не був опублікований раніше в інших видавництвах і не був поданий до публікації в інші видання.

Адреса редакційної колегії: вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007
Телефони: (+38 0542) 68-78-52, (+38 0542) 33-41-09
Електронна адреса: jes.sumdu@gmail.com
Web-site: <http://jes.sumdu.edu.ua/>

Свідоцтво про Державну
реєстрацію друкованого засобу масової інформації
КВ № 20499-10299 ПР від 11.12.2013

Міністерство освіти і науки України

The Ministry of Education and Science of Ukraine

Министерство образования и науки Украины

ЖУРНАЛ ІНЖЕНЕРНИХ НАУК

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

ЖУРНАЛ ИНЖЕНЕРНЫХ НАУК

Науковий журнал

Scientific Journal

Научный журнал

Відповідальний за випуск

Д. В. Криворучко

Комп'ютерне складання та верстання:

О. В. Крухмаль

Коректори:

Н. А. Гавриленко, Н. З. Ключко, Н. В. Лисогуб, С. М. Симоненко

Підписано до друку 29.12.2015. Формат 60 x 84 / 8.

Папір офс. Друк офс.

Ум. друк. арк. 8,84. Обл.-вид. арк. 9,86.

Наклад 100 пр. Замовлення №

Сумський державний університет. 40007, м., Суми, вул. Римського-Корсакова, 2

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру

ДК № 3062 від 17.12.2007.

Надруковано у друкарні СумДУ

вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007