

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

# **ВІСНИК**

**Східноукраїнського  
національного університету  
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

**№ 5 (222)  
2015**

**НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ**

**Сєвєродонецьк 2015**

# ВІСНИК

СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО  
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

**№ 5 (222) 2015**

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

ЗАСНОВАНО У 1996 РОЦІ

ВИХІД З ДРУКУ - ВІСІМНАДЦЯТЬ РАЗІВ НА РІК

Засновник

Східноукраїнський національний університет

імені Володимира Даля

Журнал зареєстровано

в Міністерстві юстиції України

Свідоцтво про державну реєстрацію

серія КВ № 15607-4079ПР

від 18.08.2009 р.

# VISNIK

OF THE VOLODYMYR DAHL EAST  
UKRAINIAN NATIONAL UNIVERSITY

**№ 5 (222) 2015**

THE SCIENTIFIC JOURNAL

WAS FOUNDED IN 1996

IT IS ISSUED EIGHTEEN TIMES A YEAR

Founder

Volodymyr Dahl East Ukrainian National

University

Registered by the Ministry

of Justice of Ukraine

Registration Certificate

KB № 15607-4079ПР

dated 18.08.2009

Журнал включено до Переліків наукових видань ВАК України (Бюл. ВАК №3 2010 р.), (Бюл. ВАК №5 2010 р.), (Бюл. ВАК №3 2010 р.), (Бюл. ВАК №11 2010 р.), (Бюл. ВАК №7 2011 р.) в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук з *технічних, економічних, історичних, хімічних та фізико-математичних наук* відповідно.

ISSN 1998-7927

## Головна редакційна колегія:

*Поркуян О.В.*, докт. техн. наук (головний редактор),  
*Голубенко О.Л.*, член-кор. Академії педагогічних наук,  
докт. техн. наук (заступник головного редактора),  
*Марченко Д.М.*, докт. техн. наук (заступник головного  
редактора),  
*Бузько І.Р.*, докт. екон. наук, (заступник головного  
редактора),  
*Арлінський Ю.М.*, докт. фіз.-мат. наук, (заступник  
головного редактора),  
*Михайлюк В.П.*, докт. іст. наук, (заступник головного  
редактора),  
*Галстян Г.А.*, докт. хім. наук, (заступник головного  
редактора),  
*Архипов О.Г.*, докт. техн. наук,  
*Глікін М.А.*, докт. техн. наук,  
*Горбунов М.І.*, докт. техн. наук,  
*Кравченко О.П.*, докт. техн. наук,  
*Носко П.Л.*, докт. техн. наук,  
*Осенін Ю.І.*, докт. техн. наук,  
*Рач В.А.*, докт. техн. наук,  
*Рязанцев О.І.*, докт. техн. наук,  
*Смолій В.М.*, докт. техн. наук,  
*Соколов В.І.*, докт. техн. наук,  
*Стенцель Й.І.*, докт. техн. наук,  
*Суворін О.В.*, докт. техн. наук,  
*Чернецька-Білецька Н.Б.*, докт. техн. наук,

*Даніч В.М.*, докт. екон. наук,  
*Заблюцька І.В.*, докт. екон. наук,  
*Козаченко Г.В.*, докт. екон. наук,  
*Костирко Л.А.*, докт. екон. наук,  
*Надьон Г.О.*, докт. екон. наук,  
*Рамазанов С.К.*, докт. техн. наук, докт. екон. наук,  
*Черняєська Є.І.* докт. екон. наук,  
*Чиж В.І.*, докт. екон. наук,  
*Голубничий П.І.*, докт. фіз.-мат. наук,  
*Ємець О.О.*, докт. фіз.-мат. наук,  
*Татарченко Г.О.*, докт. техн. наук,  
*Філоненко А.Д.*, докт. фіз.-мат. наук,  
*Барабаш Ю.В.*, докт. іст. наук,  
*Войтович Л.В.*, докт. іст. наук,  
*Довжук І.В.*, докт. іст. наук,  
*Дьомін О.Б.*, докт. іст. наук,  
*Д'яконіхін А.В.*, канд. іст. наук,  
*Сапицька О.М.*, канд. іст. наук,  
*Сергієнко Ю.Г.*, докт. іст. наук,  
*Стяжкіна О.В.*, докт. іст. наук,  
*Черняєський Г.Й.*, докт. іст. наук,  
*Голосман Є.З.*, докт. хім. наук,  
*Кудюков Ю.П.*, докт. хім. наук,  
*Новіков В.П.*, докт. хім. наук,  
*Кондратов С.О.*, докт. хім. наук,  
*Галстян А.Г.*, докт. хім. наук

**Відповідальний за випуск: д.т.н., професор Соколов В.І.**

Рекомендовано до друку Вченою радою Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (Протокол № 3 від 27. 11. 2015 р.)

Матеріали номера друкуються мовою оригіналу.

© Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, 2015  
© Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 2015

## ЗМІСТ

<b>Доума Мансур Аль-Махді, Осенін Ю.Ю., Сергієнко О.В.</b> ЗАЛЕЖНІСТЬ СИЛИ ТЕРТЯ ДИСКОВОГО ГАЛЬМА ВІД СЕРЕДНЬОЇ ТЕМПЕРАТУРИ ФРИКЦІЙНОГО КОНТАКТУ .....	7
<b>Жидков А.Б., Марченко Д.М.</b> МАГНІТОМЕТРИЧНИЙ ПРИЛАД НОВОГО ПОКОЛІННЯ ДЛЯ ОЦІНКИ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ .....	12
<b>Кроль О.С.</b> ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕСУЩЕЙ СИСТЕМЫ МНОГООПЕРАЦИОННОГО СТАНКА .....	18
<b>Кроль О.С., Хмельницький А.В.</b> 3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА УГЛОВОЙ ГОЛОВКИ МНОГООПЕРАЦИОННОГО СТАНКА .....	24
<b>Кроль О.С., Хмельницький А.В.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА УГЛОВОЙ ГОЛОВКИ МНОГООПЕРАЦИОННОГО СТАНКА .....	32
<b>Кульшев А.М., Черникова И.Д., Черников Н.Г.</b> НАНОМЕТРИЧЕСКИЙ КОРПУСКУЛЯРНЫЙ ФОТОЭЛЕКТРОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР .....	40
<b>Логунов А.Н.</b> ВЛИЯНИЕ ИСКАЖЕНИЯ ФОРМЫ ЭЛЕМЕНТОВ НА ПРОЦЕСС РАСПОЗНАВАНИЯ ПЕРФОРАЦИОННОГО МАРКЕРА .....	46
<b>Мелконов Г.Л.</b> СТОЙКОСТЬ ИНСТРУМЕНТОВ С КРУГОВОЙ РЕЖУЩЕЙ КРОМКОЙ .....	51
<b>Melkonov G.L.</b> EXPERIMENTAL VALIDATION OF MATHEMATICAL MODEL FOR A 4-SPINDLE GRINDING- POLISHING MACHINE KINEMATICS .....	56
<b>Мелконов Л.Д.</b> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗАНЬЯ ОТ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ И УГЛА СКРЕЩИВАНИЯ ПРИ ЧИСТОВОМ ТОЧЕНИИ ВАЛОВ ЧАШЕЧНЫМИ ПРИНУДИТЕЛЬНО ВРАЩАЮЩИМИСЯ РЕЗЦАМИ .....	59
<b>Мицьк А.В.</b> МУЛЬТИЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ И МОДУЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ В ПРАКТИКЕ ОТДЕЛОЧНО-ЗАЧИСТНОЙ ВИБРООБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ СВОБОДНЫМИ АБРАЗИВНЫМИ СРЕДАМИ .....	64
<b>Никитченко И.В., Шведчикова И.А.</b> СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ ГАЗОВ, ВЫДЕЛЯЕМЫХ ПРИ ЗАТОПЛЕНИИ ШАХТ .....	73
<b>Николаенко А.П.</b> К ВОПРОСУ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СТАНКОВ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ .....	79
<b>Николаенко А.П.</b> МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ, ЩО ВИНΙΚАЮТЬ У КОНТЕЙНЕРІ ВІБРАЦІЙНОГО ВЕРСТАТА .....	83
<b>Рассказова Ю.Б.</b> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ОБЪЕМНОГО ГИДРОПРИВОДА .....	88

---

<b>Романченко А.В.</b> СИНТЕЗ ЭЛЕМЕНТОВ КЛАССИФИКАЦИИ ДЕТАЛЕЙ ПОДЛЕЖАЩИХ ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКЕ .....	92
<b>Соколов В.И.</b> ИЗМЕРЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИМЕСИ В КАНАЛАХ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ .....	97
<b>Соколов В.И.</b> КРИТЕРИАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДИФфуЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ ВЕНТИЛЯЦИИ.....	101
<b>Соколова Я.В., Рассказова Ю.Б.</b> МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОМАТИЧЕСКОГО ГИДРОПРИВОДА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....	105
<b>Таванюк Т.Я.</b> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО СЛЕДЯЩЕГО ПРИВОДА. ....	111
<b>Таванюк Т.Я., Соколова Я.В.</b> КОРРЕКЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОМАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРИВОДА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ .....	116
<b>Хмельницкий А.В., Кроль О.С.</b> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЛЕКСА СТАНДАРТОВ ЕСКД В САПР КОМПАС.....	120
<b>Шалевська І.А.</b> ЕКОЛОГІЧНА СИТУАЦІЯ У МЕТАЛУРГІЙНОМУ ПЕРЕДЛІ ЛИВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ ВИЛИВКІВ З ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВИХ СПЛАВІВ.....	124
<b>Шевченко А.В.</b> МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА РАСТВОРЕНИЯ ЯДРА В ПЛАКИРУЮЩЕЙ ОБОЛОЧКЕ ЧАСТИЦ ПРИ НАПЫЛЕНИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОРОШКОВ.....	127
<b>Шевченко А.В.</b> МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА СИНТЕЗА ИНТЕРМЕТАЛЛИДОВ ПРИ НАПЫЛЕНИИ КОНГЛОМЕРАТНЫХ НИКЕЛЬ – АЛЮМИНИЕВЫХ ПОРОШКОВ.....	131
<b>Шумакова Т.А.</b> АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССА ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ СЪЕМА МЕТАЛЛА С УЧЕТОМ ФОРМЫ АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА .....	135

## CONTENTS

<b>Douma MansurAl Mahdy, Osenin Yu.Yu., Sergienko O.V.</b> DEPENDENCE OF THE FRICTION FORCE OF DISC BRAKE ON THE AVERAGE TEMPERATURE OF FRICTIONAL CONTACT .....	7
<b>Zhidkov A.B., Marchenko D.M.</b> MAGNETOMETRIC NEW GENERATION DEVICE FOR DETERMINING THE OPERABILITY OF METAL STRUCTURES .....	12
<b>Krol O.S.</b> EVALUATION OF DYNAMIC CHARACTERISTICS CARRYING SYSTEM OF MULTISOPERATION MACHINE.....	18
<b>Krol O.S., Khmelnytsky A.V.</b> 3D-MODELLING TO SPINLE'S NODE OF ANGULAR HEAD FOR MULTYOPERATION TOOL.....	24
<b>Krol O.S., Khmelnytsky A.V.</b> INVESTIGATING TO SPINLE'S NODE OF ANGULAR HEAD FOR MULTYOPERATION TOOL.....	32
<b>Kulyshv A.M., Chernikova I.D., Chernikov N.G.</b> NANOMETRIC CORPUSKULAR PHOTOELECTRON SPECTRO-METER .....	40
<b>Logunov A.N.</b> INFLUENCE DISTORTED FORM ELEMENTS ON THE RECOGNITION PROCESS PERFORATIONS MARKING .....	46
<b>Melkonov G.L.</b> THE RESISTANCE OF TOOLS WITH CIRCULAR CUTTING EDGE .....	51
<b>Мелконов Г.Л.</b> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ЧЕТЫРЁХ ШПИНДЕЛЬНОЙ ШЛИФОВАЛЬНОЙ МАШИНЫ ПОЛИРОВКИ КИНЕМАТИКИ .....	56
<b>Melkonov L.D.</b> DETERMINATION OF THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE CUTTING ANGLE OF THE CUTTING, AND WHEN CROSSING FINISH TURNING OF SHAFTS ROTATING CUTTERS TO FORCE CUP .....	59
<b>Mitsyk A.V.</b> MULTIENERGY TECHNOLOGIES AND MODULAR EQUIPMENT IN THE PRACTICE OF FINISHING-GRINDING VIBRATING TREATMENT OF PARTS WITH LOOSE ABRASIVE MEDIA.....	64
<b>Nikitchenko I.V. Shvedchikova I.A.</b> COMPARATIVE ANALYSIS OF THE METHODS FOR MONITORING OF POTENTIALLY DANGEROUS GASES PRODUCED BY FLOODED MINES .....	73
<b>Nikolaenko A.P.</b> TO THE QUESTION OF MACHINE TOOLS REABILITY FORECASTING WITH THE METHODS OF MATHEMATICAL MODELING .....	79
<b>Nikolaenko A.P.</b> MATHEMATICAL MODELING OF PROCESSES OCCURRING IN THE CONTAINER OF THE VIBRATING MACHINE .....	83
<b>Rasskazova Yu.B.</b> EXPERIMENTAL STUDIES OF THE EFFECTIVENESS OF REGULATING OF VOLUME HYDRAULIC DRIVE.....	88
<b>Romanchenko A.V.</b> SYNTHESIS OF CLASSIFICATION ELEMENTS OF DETAILS SUBJECT TO VIBRATION TREATMENT .....	92

---

<b>Sokolov V.I.</b> MEASUREMENT OF ADMIXTURE CONCENTRATION IN CHANNELS OF VENTILATION SYSTEMS. ....	97
<b>Sokolov V.I.</b> CRITERION ANALYSIS OF DIFFUSIVE PROCESSES IN VENTILATION SYSTEMS .....	101
<b>Sokolova Ya.V., Rasskazova Yu.B.</b> MODELING OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF AUTOMATIC ELECTROHYDRAULIC DRIVE OF MACHINE BUILDING EQUIPMENT.....	105
<b>Tavanuk T.Ya.</b> EXPERIMENTAL STUDY OF THE ELECTRO-HYDRAULIC SERVO DRIVE .....	111
<b>Tavanyuk T.Ya., Sokolova Ya.V.</b> CORRECTION OF DYNAMIC CHARACTERISTICS AUTOMATIC ELECTROHYDRAULIC ACTUATORS MACHINE BUILDING EQUIPMENT.....	116
<b>Khmelnitsky A.V., Krol O.S.</b> USING SET OF STANDARDS ESKD IN THE CAD KOMPAS .....	120
<b>Shalevskaya I.A.</b> ECOLOGICAL SITUATION IN METALLURGIC REPARTITION PROCESS OF THE FOUNDRY INDUSTRY DURING IRON-OXIDE ALLOY CASTING.....	124
<b>Shevchenko A.V.</b> MATHEMATICAL MODEL OF THE SYNTHESIS OF INTERMETALLIDE DURING THE DEPOSITION OF THE CONGLOMERATE NICKEL – ALUMINIUM POWDERS .....	127
<b>Shevchenko A.V.</b> MATHEMATICAL MODEL OF THE SYNTHESIS OF INTERMETALLIDE DURING THE DEPOSITION OF THE CONGLOMERATE NICKEL – ALUMINIUM POWDERS .....	131
<b>Shumakova T.A.</b> ANALYSIS OF MATHEMATICAL MODELS OF THE PROCESS OF VIBRATORY PROCESSING FOR DETERMINING METAL REMOVAL RATES WITH REGARD TO THE SHAPE OF THE ABRASIVE TOOL .....	135

УДК 62-592.1 + 53.082

## ЗАЛЕЖНІСТЬ СИЛИ ТЕРТЯ ДИСКОВОГО ГАЛЬМА ВІД СЕРЕДНЬОЇ ТЕМПЕРАТУРИ ФРИКЦІЙНОГО КОНТАКТУ

Доума Мансур Аль-Махді, Осенін Ю.Ю., Сергієнко О.В.

## DEPENDENCE OF THE FRICTION FORCE OF DISC BRAKE ON THE AVERAGE TEMPERATURE OF FRICTIONAL CONTACT

Douma Mansur Al Mahdy, Osenin Yu.Yu., Sergienko O.V.

*В статті встановлена залежність сили тертя дискового гальма від температури, яка генерується в зоні фрикційного контакту в результаті силової взаємодії робочих елементів гальма. Показано, що сила тертя при взаємодії елементів «вуглець-сталь» і «чавун-сталь» мають протилежні тенденції при збільшенні температури (сила тертя для вуглецю збільшується з ростом температури, для чавуну зменшується). Дістало подальшого розвитку уявлення про залежність зміни сили тертя для з'єднань «вуглець-сталь» і «чавун-сталь» в умовах впливу температури.*

*Врахування закономірності залежності сили тертя дискового гальма від температури на конструкторсько-технологічній стадії створення дискового гальма дозволяє підвищити його надійність та забезпечити працездатність.*

**Ключові слова:** рухомий склад, дискове гальмо, сила тертя, фрикційні матеріали, залежність.

**Вступ.** Однією з актуальних проблем сучасного залізничного транспорту є гальмування рухомого складу. Проблема обумовлена високим рівнем швидкості на залізниці, який досягає значень 350 км/год. Негативними наслідками гальмування рухомого складу є висока температура в зоні контакту фрикційних елементів гальма, що досягає значень у 600-700 градусів за Цельсієм та впливає на зменшення значень коефіцієнту тертя, що реалізується, та збільшення інтенсивності зношування робочих поверхонь елементів гальма [1, 2].

Головними напрямками вирішення цієї проблеми на сучасному етапі є розробка нових фрикційних матеріалів, які б за рахунок своїх індивідуальних властивостей мали змогу нівелювати негативний вплив високої температури на фрикційні характеристики дискового гальма [3, 4].

Як відомо, процес розробки нових фрикційних матеріалів довготривалий та коштовний і на цей час

фрикційні матеріали, які б повністю задовольняли сучасним вимогам за критеріями коефіцієнту тертя, стійкістю до термічного впливу, а також прийнятною інтенсивністю зношування робочих поверхонь відсутні [5, 6].

Ефективність конструкторсько-технологічних засобів щодо створення нових фрикційних матеріалів та удосконалення конструкції фрикційного гальма залежить від достеменної інформації про процеси, що відбуваються в зоні фрикційного контакту дискового гальма, головними з яких є вплив температури, що генерується, на характеристики силової взаємодії елементів тертя, а саме безпосередньо на силу тертя дискового гальма [5, 6]. Результати отримані для перспективного фрикційного матеріалу на основі вуглецю та найбільш поширеному – чавуну.

**Метою статті є** встановлення залежності сили тертя дискового гальма від температури, яка генерується в зоні фрикційного контакту в результаті силової взаємодії його елементів, що виготовлені з вуглецю та чавуну.

**Викладення основного матеріалу.** Експериментальне дослідження виконане на створеному лабораторному натурному стенді кафедри гідрогазодинаміки Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, який відтворює умови силової взаємодії елементів дискового гальма в реальному масштабі часу, діючих сил, теплових потоків та швидкостей відносного руху його елементів (рис. 1) [7].

Стенд містить асинхронний електродвигун 1 номінальною потужністю 75 кВт і частотою обертів 1480 об/хв, з'єднаний пружними муфтами 3, редуктором 2, а також з підшипниковим вузлом 3, на валу якого розміщений гальмівний диск 6, гальмівні накладки 7, що закріплені за допомогою механізму 5, з'єданого з важільною системою

навантаження 4 дискового гальма (зусилля задається еталонними вагами 9), та пружну систему вимірювання сили тертя 8.

Важільний механізм 5, що використовується для притиснення гальмівних накладок 7 до гальмівного диска 6, та сам диск є конструктивними елементами дискового гальма трамвайного вагона ЛТ-10 виробництва ПАТ «Луганськтепловоз». Трибологічні характеристики контакту робочих елементів приведені до відповідності з реальними [8]. Важільна система навантаження 4 дискового гальма, у залежності від потрібного гальмівного зусилля, має два варіанти реалізації, які відрізняються значенням передаточного числа.

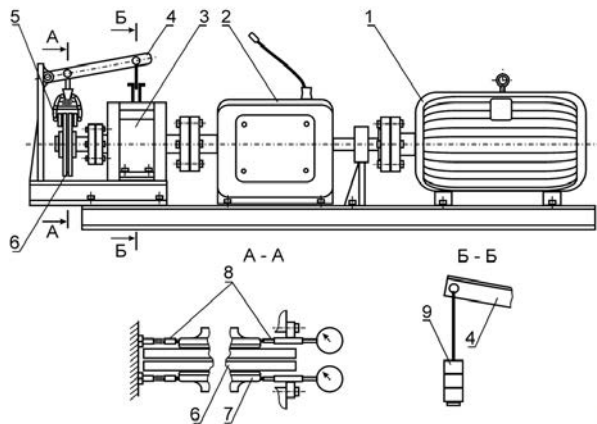


Рис. 1. Принципова схема експериментального стенда

Передаточне число важільної системи, що використовувалося у нашому випадку, визначається за формулою:

$$n = k \cdot \eta \cdot [(a + b)/a] \cdot c/d, \quad (1)$$

де  $a, b, c, d$  – довжини відповідних важелів;

$k = 1/[2\text{tg}(6^\circ)] = 4,76$  – геометрична константа;

$\eta$  – механічний ККД важільної передачі ( $\eta \approx 0,95$ ).

Зусилля притиску, що передається на одну гальмівну накладку експериментального стенда визначається як:

$$N = n \cdot G/2, \quad (2)$$

де  $G$  – зусилля навантаження стенда, що задається еталонними вагами.

У якості редуктора (поз. 2 на рис. 1) використовується п'ятиступенева механічна коробка передач автомобіля «ЗІЛ-130». Це дає можливість одержання п'яти значень частоти обертів гальмівного диска: 210; 360; 640; 1006; та 1480 об/хв, що відповідає, з урахуванням шляху тертя, швидкості руху потяга у 43; 74; 133; 208 та 307 км/год відповідно (у перерахунку на залізничні колеса діаметром 1,05 м).

Зазначені вище характеристики елементів важільної системи стенда зведено у табл. 1.

При проведенні експериментів сила тертя взаємодії елементів дискового гальма визначалась опосередковано за допомогою виміру деформацій пружного елемента, яка спостерігалась у результаті прикладення зусилля. Деформація вимірювалась за допомогою мікрометричного індикатора часового типу (далі мікрометричним індикатором) ІЧ-10 (ДСТ 577-68, діапазон вимірювання 0...0,01 м, ціна поділки  $0,01 \cdot 10^{-3}$  м, межа основної похибки, що допускається,  $\pm 20 \cdot 10^{-6}$  м) окремо для кожної гальмівної накладки.

Таблиця 1

Характеристики важільної системи навантаження експериментального стенда

Довжина важеля, м	a	b	c	d
	0,10	0,43	0,37	0,37
	Сумарна маса важелів, кг			Передаточне число
	0,70			33,0

Мікрометричний індикатор з'єднаний безпосередньо з гальмівною накладкою, у яку з діаметрально протилежної сторони упирається пружний елемент. Причому повздовжня вісь вимірювального стержня мікрометричного індикатора направлена паралельно поверхні гальмівного диска.

Таким чином, сила тертя, що виникає між накладкою та гальмівним диском, призводить до деформації пружного елемента (стисненню пружини), яка вимірюється мікрометричним індикатором. Величина вказаної сили тертя для однієї гальмівної накладки визначається як:

$$F_{\text{тр}} = C \cdot \varphi \cdot 10^{-5} = 1,2 \cdot \varphi; \quad [H], \quad (3)$$

де  $C = 1,2 \cdot 10^5$  Н/м – жорсткість пружини пружного елемента системи вимірювання сили тертя експериментального стенда;

$\varphi$  – показання мікрометричного індикатора у поділках (1 поділка відповідає  $1 \cdot 10^{-5}$  м).

Відповідну тарувальну характеристику мікрометричного індикатора, що використовується для визначення сили тертя, наведено на рис. 2.

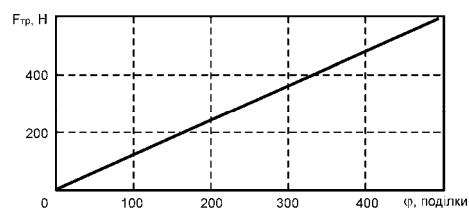


Рис. 2. Тарувальна характеристика мікрометричного індикатора

Для контролю температури поверхонь тертя використовувався безконтактний інфрачервоний термометр UT-300В (далі інфрачервоний термометр), який нерухомо закріплюється за допомогою штатива на відповідній відстані від досліджуваної поверхні.

Націлювання на зазначену поверхню відбувається за допомогою лазерного цілківказівника, що вбудовано у пристрій. Інфрачервоний термометр дозволяє дистанційно вимірювати температуру у діапазоні:  $-18 \div 380 \text{ }^\circ\text{C}$ , з межею основної похибки  $\pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$  (за температурою навколишнього середовища  $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ) у режимі реального часу (час відгуку 0,5 с) з роздільною здатністю  $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ . Коефіцієнт випромінювання дорівнює 0,95. Оптична роздільна здатність відповідає відношенню 10 до 1, тобто лінійна відстань (D) до поверхні, що досліджується, відноситься до площі плями (S), температура якої визначається як  $D/S = 10/1$ .

Для вимірювання величини мас, що навантажує важільну систему експериментального стенда, використовувались портативні електронні ваги з межею основної похибки  $\pm 0,01 \text{ кг}$  (у діапазоні від 0,01 до 40 кг та нормальних зовнішніх умовах).

У процесі експерименту контролювалися такі параметри:

- частота обертів гальмівного диска;
- навантаження важільної системи;
- деформація пружного елемента;
- температура в зоні контакту робочих елементів.

Діапазон значень кінцевих параметрів, що використовувались при проведенні експерименту, а також допоміжні величини, наведено у табл. 2.

Таблиця 2

**Значення параметрів, що варіювалися у процесі експериментальних досліджень**

Назва параметра	Значення
Частота обертів гальмівного диска, об/хв (відповідна кутова швидкість, рад/с)	210; 360; 640; 1006; 1480 (22,0; 37,7; 67,0; 105,4; 155,0)
Сила нормального притиску накладки до гальмівного диска, Н	290; 462; 751; 1046; 1336; 1509; 1683
Розрахунковий номінальний тиск у контакті накладки з гальмівним диском, кПа	87,8; 139,9; 227,7; 317,0; 404,8; 457,4; 510
Маса ваг, які використовувались у процесі окремого дослідження з урахуванням маси важелів, кг	1,67; 2,66; 4,33; 6,03; 7,70; 8,70; 9,70
Комбінації матеріалів пари тертя накладка – гальмівний диск	чавун – сталь; вуглець – сталь; чавун – вуглець – сталь

Кожний окремий замір сили тертя проводився при сталому режимі роботи стенда. Контрольовані параметри фіксувались після того, як стабілізувалась температура відповідних фрикційних поверхонь, що визначалось за допомогою інфрачервоного термометра. Час температурної стабілізації становив, залежно від умов проведення експерименту, від 10 до 15 хвилин. Максимальна температура, при досягненні якої припинявся дослід, становила  $360 \text{ }^\circ\text{C}$  (це обумовлено здатністю стенда поглинати і розсіювати тепло, а також обмеженнями термостійкості чавуну, що використовувався як один з фрикційних матеріалів).

Кожен з дослідів виконувався окремо і незалежно від інших. Для створення однакових умов проведення експериментів дослідний стенд (його фрикційний вузол – гальмівний диск з накладками) перед кожним вимірюванням охолоджувався до температури навколишнього середовища.

Для синхронізації зчитування даних з приладів, та їх прив'язки до часу випробування, використовувалась відеозйомка, у процесі якої циферблати обох мікрометричних індикаторів та дисплей інфрачервоного термометра одночасно знаходились у полі зору відеокамери, що записувала їх показання у процесі експерименту.

Температура навколишнього повітря під час досліджень знаходилась у межах  $24...27 \text{ }^\circ\text{C}$ , атмосферний тиск: 753 мм.рт.ст., вологість повітря: 58 %.

Одержані шляхом експериментальних досліджень залежності коефіцієнта тертя між накладками та гальмівним диском від середньої поверхневої температури, наведено на рис. 3-5. Експериментальні значення величин показано на графіках окремими точками (одержані шляхом осереднення серії паралельних вимірів).

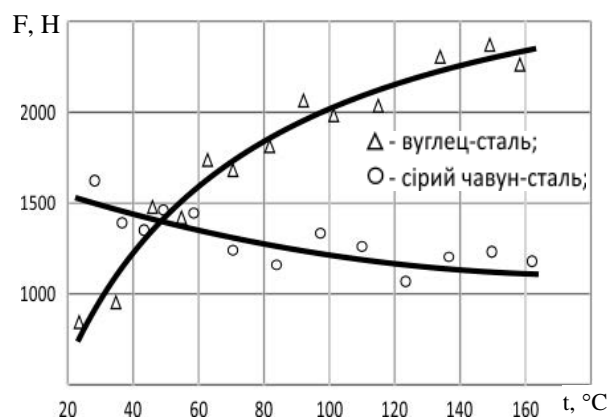


Рис. 3 Сила тертя у сполученні накладка – гальмівний диск у залежності від середньої поверхневої температури; контактний тиск: 0,3 МПа

Наведені графіки температурних залежностей не містять довірчих інтервалів, оскільки їх величини не перевищують розмір маркера точки (в обраному масштабі), замість цього на них відображено кожне

з експериментальних значень, що одержані при паралельних дослідях.

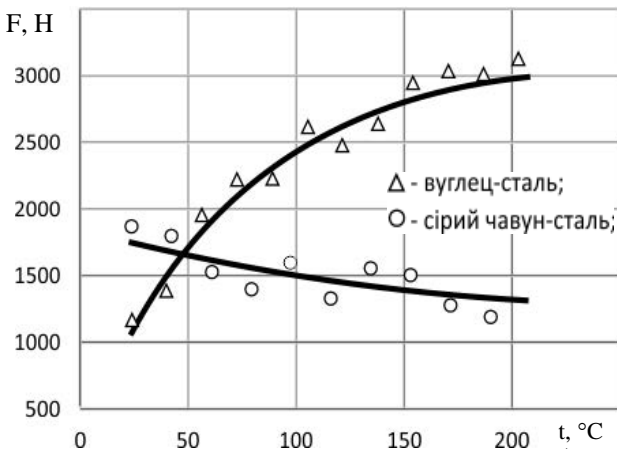


Рис. 4. Сила тертя у сполученні накладка – гальмовий диск у залежності від середньої поверхневої температури; контактний тиск: 0,4 МПа

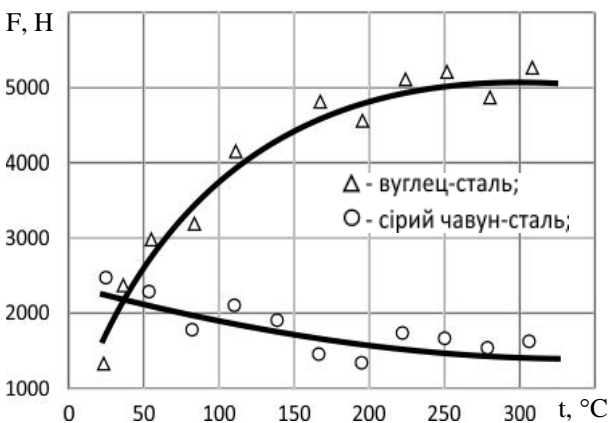


Рис. 5. Сила тертя у сполученні накладка – гальмовий диск у залежності від середньої поверхневої температури; контактний тиск: 0,5 МПа

Одержані значення експериментальних величин перевірено на відсутність грубих помилок за допомогою критерію Граббса.

#### Висновки:

1. Температура, яка генерується у зоні контакту фрикційних елементів є головним чинником впливу на силу тертя дискового гальма.

2. Сила тертя при взаємодії сполучення «вуглець - сталь» та «чавун - сталь» зі збільшенням температури має протилежні тенденції щодо зміни (сила тертя вуглецю зі зростанням температури збільшується, чавуну – зменшується).

#### Література

1. Biloborodova I., Sosnov I., Sergienko O. On contact thermal resistance in the system of active effective cooling of the locomotive disk brake. // TEKA Commission of

Motorization and Agriculture. Lublin, Polska Akademia nauk Oddzial w Lubline, 2010. - Vol. XB. - P. 362-370.

- Osenin Yu.Yu. Forced cooling of friction elements of disc brake: Europe's braking conference & exhibition ["EuroBrake 2014"] (13 – 15 May. 2014), EuroBrake 2014. – Lille (FRANCE), 2014. – P. 315 – 323.
- Osenin Yu., Sosnov I., Sergienko O. Creation method of frictional properties of the disc brake: Europe's braking conference & exhibition ["EuroBrake 2013"] (17 – 19 June. 2013), EuroBrake 2013. – Dresden (GERMANY), 2013. – P. 238 – 244.
- Yuriy Yu. Osenin, Igor Sosnov. Mathematical modeling unstationary friction interaction of working elements disc brake locomotive. // TEKA Commission of Motorization and power industry Agriculture and the Volodymir Dahl East-Ukrainian National University of Lugansk. – Lublin, 2011. – Vol. XI. B. – P. 111 – 120.
- Справочник по триботехнике / Под общ. ред. М. Хебды, А.В.Чичинадзе. В 3 т. Т.1. Теоретические основы. – М.: Машиностроение, 2000. – 411 с.
- Триботехника / Д.Н. Гаркунов, Э.Л. Мельников, В.С. Гаврилюк. – М.: КНОРУС, 2013. – 408 с.
- Осенін Ю.Ю., Сергієнко О.В., Соснов І.І., Бугаєнко В.В., Погребнова Н.Є. Стенд для дослідження взаємодії робочих елементів дискового гальма. Патент на корисну модель № 79205; Заявл. 15.11.2012; Дата опубл. 10.04.2013, Бюл. № 7.
- Osenin, Yu., Biloborodova, I., Sosnov, I., Sergienko O. Heat abstraction from contact zone of working elements of disc brake. // TEKA Commission of Motorization and Agriculture. Lublin, Polska Akademia nauk Oddzial w Lubline, 2014. - Vol. 14. - No. 2. - P. 79 - 85.

#### References

- Biloborodova I., Sosnov I., Sergienko O. On contact thermal resistance in the system of active effective cooling of the locomotive disk brake. // TEKA Commission of Motorization and Agriculture. Lublin, Polska Akademia nauk Oddzial w Lubline, 2010. - Vol. XB. - P. 362-370.
- Osenin Yu.Yu. Forced cooling of friction elements of disc brake: Europe's braking conference & exhibition ["EuroBrake 2014"] (13 – 15 May. 2014), EuroBrake 2014. – Lille (FRANCE), 2014. – P. 315 – 323.
- Osenin Yu., Sosnov I., Sergienko O. Creation method of frictional properties of the disc brake: Europe's braking conference & exhibition ["EuroBrake 2013"] (17 – 19 June. 2013), EuroBrake 2013. – Dresden (GERMANY), 2013. – P. 238 – 244.
- Yuriy Yu. Osenin, Igor Sosnov. Mathematical modeling unstationary friction interaction of working elements disc brake locomotive. // TEKA Commission of Motorization and power industry Agriculture and the Volodymir Dahl East-Ukrainian National University of Lugansk. – Lublin, 2011. – Vol. XI. B. – P. 111 – 120.
- Khebda, M., Chichinadze, A.V. Reference book on tribotechnology. Theoretical foundations, V.1, Engineering industry, 2000. – p. 411.
- Garkunov, D., Melnikov, E., Gavrilyuk, V. Tribotechnology, M.: KNORUS, 2013. – p. 407.
- Osenin Yu.Yu., Sergienko O.V., Sosnov I.I., Bugaenko V.V., Pogrebnova N.E. Test Bench for Researching Interaction of Working Elements of Disc Brake. Utility model No. 79205; Date of application 15.11.2012; Date of issue 10.04.2013, Bulletin No. 7.
- Osenin, Yu., Biloborodova, I., Sosnov, I., Sergienko O. Heat abstraction from contact zone of working elements of disc brake. // TEKA Commission of Motorization and

Agriculture. Lublin, Polska Akademia nauk Oddzial w Lubline, 2014. - Vol. 14. - No. 2. - P. 79 - 85.

**Доума Мансур Аль-Махди, Осенин Ю.Ю., Сергиенко О.В. Зависимость силы трения дискового тормоза от средней температуры фрикционного контакта**

*В статье установлена зависимость силы трения дискового тормоза от температуры, которая генерируется в зоне фрикционного контакта в результате силового взаимодействия тормоза. Показано, что сила трения при взаимодействии элементов «углерод-сталь» и «чугун-сталь» имеют противоположные тенденции при увеличении температуры (сила трения для углерода увеличивается с ростом температуры, для чугуна уменьшается). Получило дальнейшее развитие представление о зависимости изменения силы трения для соединений «углерод-сталь» и «чугун-сталь» в условиях влияния температуры.*

*Учет закономерности зависимости силы трения дискового тормоза от температуры на конструкторско-технологической стадии создания дискового тормоза позволяет повысить его надежность и обеспечить трудоспособность.*

**Ключевые слова:** подвижной состав, дисковый тормоз, сила трения, фрикционные материалы, зависимость.

**Douma Mansur Al-Mahdy, Osenin Yu. Yu., Sergienko O. V. Dependence of the friction force of disc brake on the average temperature of frictional contact**

*The article founds the dependence of friction force of disc brake on the temperature generated in the friction contact zone as a result of friction interaction of disc working elements. It demonstrates that friction force of combinations "carbon-steel" and "iron-steel" has opposite tendencies as the temperature rises (force friction increases with temperature for carbon and decreases for iron). There is further development of concept of dependence of friction force change for combinations "carbon-steel" and "iron-steel" under the influence of temperature.*

*Accounting of dependence of friction force of disc brake on the temperature at the design-engineering stage of creating disc brake allows increasing its reliability and providing operation capacity.*

**Key words:** rolling stock, disc brake, friction force, friction materials, dependence.

**Доума Мансур Аль-Махді** – аспірант кафедри гідрогазодинаміка Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля.

**Осенин Ю.Ю.** – к.т.н., доцент кафедри гідрогазодинаміка Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, [osenin\\_yu\\_yu@ukr.net](mailto:osenin_yu_yu@ukr.net)

**Сергієнко О.В.** – к.т.н., доцент, доцент кафедри графічного та комп'ютерного моделювання Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, [sergienko.o.v@gmail.com](mailto:sergienko.o.v@gmail.com)

*Рецензент:* **Марченко Д.М.**, д.т.н., професор

Стаття подана 22.10.2015.

УДК 621.317.49

## МАГНІТОМЕТРИЧНИЙ ПРИЛАД НОВОГО ПОКОЛІННЯ ДЛЯ ОЦІНКИ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ

Жидков А.Б., Марченко Д.М.

### MAGNETOMETRIC NEW GENERATION DEVICE FOR DETERMINING THE OPERABILITY OF METAL STRUCTURES

Zhidkov A.B., Marchenko D.M.

Викладено основні принципи побудови магнітометричного пристрою для визначення працездатності металоконструкцій на підставі визначення ступеню втомних пошкоджень. Наведено основні вимоги до пристрою, обґрунтовано вибір всіх вузлів пристрою, описано принцип його роботи та наведено блок-схему. Представлені попередні результати використання пристрою. Описано принципи візуалізації результатів вимірювання для оперативного контролю результатів вимірювання.

**Ключові слова:** втомні пошкодження, магнітні властивості, прилад, вузли, візуалізація

#### Вступ

Причиною руйнування більшості металоконструкцій є накопичення певного рівня втомних пошкоджень. На початковому етапі ці мікропошкодження можуть накопичуватися доволі тривалий час, а потім руйнування йде стрімко. Основною причиною втомного руйнування є вичерпання пластичності металу у місцях, де локально проходить пластична деформація. Особлива небезпека саме втомного руйнування полягає в тім, що ззовні часто немає ніяких ознак цього процесу і перехід конструкції у стадію, що безпосередньо передуює руйнуванню визначити зовнішнім оглядом неможливо [1].

Для визначення працездатності конструкцій існує багато способів та приладів, які призначені для виявлення різних макро- та мікродфектів, але визначення саме ступінь втомного пошкодження досі надійно не вдається [2-5]. Одним з можливих шляхів для вирішення цієї задачі є визначення зміни магнітних властивостей металу в ділянках, де відбувається пластична деформація та оцінка на підставі зміни магнітних властивостей ступеня деформації та працездатності конструкції з точки зору накопичення втомних пошкоджень.

Метою цієї статті є формування загальних вимог до магнітометричного приладу (МП) нового покоління для оцінки працездатності металоконструкцій на підставі уявлень про механізм

втомного руйнування та практики використання приладів неруйнівного контролю.

#### Викладення основного матеріалу

Відомо, що феромагнітні матеріали, з яких виготовлено більшість металоконструкцій значно змінюють свої магнітні властивості під дією пластичної деформації [6-8]. Для магнітних сталей різного класу пластична деформація призводить до зниження магнітної проникності та підвищення коерцитивної сили [9].

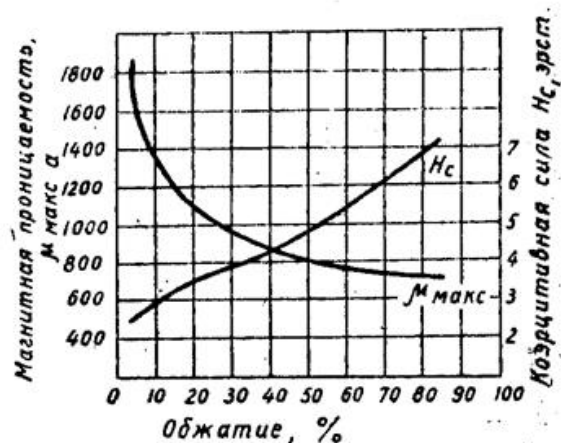


Рис. 1. Залежність магнітних параметрів феромагнітного матеріалу від ступеня обжаття [9]

Тому, ділянки з об'ємами металу, що був деформований намагнічуються зовнішніми магнітними полями гірше, у порівнянні з металом, що знаходиться у початковому стані. Наявність мікротріщин, навіть невеликих розмірів і у малій кількості, також впливає на здатність до намагнічування у бік її зниження.

Оскільки реальна металоконструкція під час виготовлення та при експлуатації завжди знаходиться під дією зовнішніх магнітних полів (поле Землі, наведені поля від електродвигунів, електроприладів, дротів під напругою, тощо), вона

отримує залишкове намагнічування і магнітне поле поблизу поверхні конструкції суттєво відрізняється від фонового магнітного поля.

Робота запропонованого МП ґрунтується на вимірюванні магнітного поля на поверхні металокопункції і подальшій обробці отриманих значень. Методика саме вимірювання магнітного поля на реальній конструкції з урахуванням нерівномірності її намагнічування та методика обробки отриманих даних виходить за межі даної статті. Тут ми розглянемо тільки принципіальні основи побудови МП та сформулюємо вимоги до його основних вузлів.

### Результати досліджень

Будь-який прилад в загальному вигляді складається з чутливого елемента (датчика), блока обробки сигналу, індикатора, джерела живлення (при необхідності) та шини даних.

Сучасним трендом розвитку приладобудування є використання цифрових датчиків, які є більш захищеними від електромагнітного шуму, меншими за розмірами та менш енергоємними. До того ж з ними добре поєднуються цифрові засоби обробки та представлення результатів вимірювання.

С точки зору зручності експлуатації МП, необхідно досягти якомога менших його розмірів та ваги, доброї захищеності від атмосферного впливу, тривалого часу автономної роботи та простоти у керуванні приладом. При використанні МП для обстеження мостів, естакад, веж, та інших промислових об'єктів робота оператора на висоті та у незручному положенні є повсякденністю, тому вимоги до габаритів, ваги та інші ергономічні показники є найважливішими. Метою є створення приладу за розмірами та вагою ідентичного сучасному мобільному телефону.

Отже прийнято рішення будувати прилад на базі універсальної плати Arduino Nano 3.0, що має малі габарити та вагу:

Таблиця 1

### Основні характеристики Arduino Nano 3.0

Параметр	Значення
Тип мікроконтролеру	ATmega328
Напруга живлення	7 – 12 В
Кількість цифрових входів/виходів	14 (з них 6 ШІМ)
Flash-пам'ять	32 КВ (2 використовуються завантажувачем)
SRAM	2 КВ
EEPROM	2 КВ
Тип зовнішнього інтерфейсу	Mini-B USB
Тактова частота	16 МГц
Розміри плати	18,5x43x8(18) мм *
Вага	5,75 г

Примітка: \* - тут та далі у дужках наведений розмір з урахуванням контактних площадок, які при необхідності можуть бути видалено

В якості датчика обрано HMC5883L, що представляє собою магнітометр, з можливістю вимірювання інтенсивності магнітного поля по 3 осям. Датчик використовує магніто-резистивний ефект, що дає добрі результати при визначенні постійних магнітних полів, або таких, що повільно змінюються.

Таблиця 2

### Характеристики HMC5883L

Параметр	Значення
Діапазон вимірювання	± 1,3 – 8 гаус (задається програмно)
Точність	5 мілігаус
Живлення	3,3 – 3,6 В (можливо живлення від стабілізатора плати)
Розміри плати	14x13x3(13) мм
Вага (з контактною площадкою)	1,1 г
Кількість задіяних входів	2

Оскільки для обробки сигналу планується використання потужного математичного апарату, необхідною складовою приладу є персональний комп'ютер, або ноутбук, з встановленою спеціальною програмою. Завданням програми є ідентифікація отриманих неоднорідностей магнітного поля поблизу поверхні металокопункції.

Запропонована плата, як і будь-які близькі за розмірами мікроконтролери, не здатна проводити такий обсяг розрахунків, та обсяг власної пам'яті не дозволяє зберігати на ній необхідний об'єм даних. Тому виникає питання збереження на окремому носії чи передачі результатів на базовий комп'ютер (БК) у режимі реального часу. В ідеальному випадку ці два процеси повинні відбуватися одночасно.

Також необхідно якимось чином оперативно виводити результати вимірювання на індикатор, який розташовано на самому МП, для визначення збоїв у роботі, та попередньої оцінки результатів обстеження.

Найбільш прийнятними характеристиками з точки зору Вага/Енергоспоживання/Наочність володіє Nokia 5110 LCD модуль, який пропонується використовувати як індикатор.

Таблиця 3

### Основні характеристики Nokia 5110

Параметр	Значення
Живлення	3,3 В (можливо живлення від стабілізатора плати)
Наявність підсвітки	Так
Колір	Монохром
Розширення	84x48 пікселів
Швидкість передачі даних	до 4Мб/с
Розміри	43x45x4(14) мм
Вага	13,85 г
Кількість задіяних входів/виходів	5

Органи керування МП складаються з 1 перемикача, що включає підсвітку екрану та щонайменше 2 кнопок «Увімкнути/Вимкнути» та «Заміри».

Можливим рішенням для розширення власної пам'яті МП може бути модуль для застосування SD або мікро-SD-карт. Було обрано модуль мікро-SD-карт, бо його габарити та вага приблизно у півтори рази менші, ніж модуля для SD-карт пам'яті.

Таблиця 4

#### Основні характеристики модуль мікро-SD-карт

Параметр	Значення
Живлення	3 - 5 В (можливо живлення від стабілізатора плати)
Підтримка карт	мікро-SD/TF
Розміри	24x41(45)x3(6) мм
Вага	5,75 г (без картки)
Кількість задіяних входів/виходів	4

Для організації радіозв'язку з метою передачі даних з МП на БК в режимі реального часу пропонується використання радіо-модулів NRF24L01, або будь-яких, що реалізують VirtualWire. Дальність роботи таких модулів складає 100-150 м на відкритому просторі і її має бути цілком достатньо. У випадках, коли відстань від МП до БК має бути більшою, можуть застосовуватися інші модулі, але вони потребують більш складного налаштування та потужнішого живлення.

Таблиця 5

#### Основні характеристики радіо-модуля NRF24L01

Параметр	Значення
Живлення	1,8 - 3,6 В (можливо живлення від стабілізатора плати)
Частота:	2,4ГГц
Швидкість передачі даних:	500 кб/с, 1Мб/с, 2Мб/с
Радіус дії:	біля 100м
Розміри	12x17x2,5 мм (без зовнішньої антени)
Вага	0,55 г (без зовнішньої антени)
Кількість задіяних входів/виходів	6

Таблиця 6

#### Основні характеристики радіо-модуля FS1000A

Параметр	Значення
Живлення	3 - 12 В (чим вища напруга, тим більша відстань зв'язку)
Частота:	433 КГц
Радіус дії:	До 150 м
Розміри	19x19(25)x5(7) мм
Вага	2,42 г
Кількість задіяних входів/виходів	1

Для порівняння наведемо характеристики радіомодуля передавача FS1000A, що реалізує VirtualWire. Характеристики приймача є менш важливими, бо він буде встановленим біля БК, а не вбудований у МП.

Як бачимо перший модуль має перевагу у вазі та габаритах, але значно програє через більшу кількість задіяних входів/виходів. Але ключовим питанням є достатня швидкість передачі даних та надійність зв'язку, що може визначити тільки комплексна перевірка. Тому остаточно питання радіо-модуля, що буде використано у МП лишається відкритим.

Блок-схема приладу виглядає таким чином (рис. 2).

Кількість задіяних входів/виходів сумарно складає 17 при використанні радіо-модуля NRF24L01 та 12 при використанні радіо-модуля FS1000A. За наявності 14 виходів у платі перший варіант потребує використання додаткового «розширювача входів», що призведе до падіння швидкості обробки інформації, зростанню необхідної потужності джерела живлення, габаритів та ваги. Але, знову необхідно зазначити, що питання організації радіоканалу потребує окремого вивчення. Так само, як і вибір джерела живлення для МП.

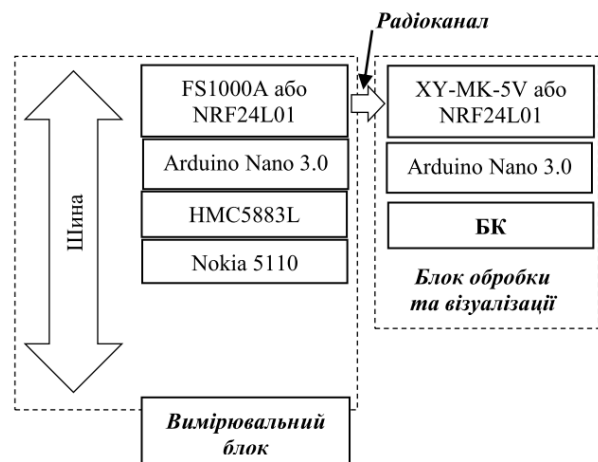


Рис. 2. Блок-схема

На рис. 3, 4 показано зібрані на макетних платах вимірювальний модуль та приймач радіоканалу, підключений до ноутбука.

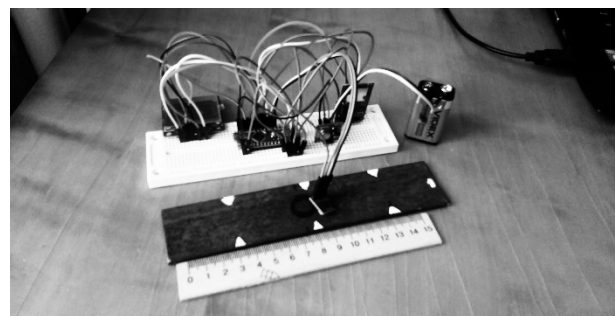


Рис. 3. Вимірювальний блок, зібраний на макетній платі

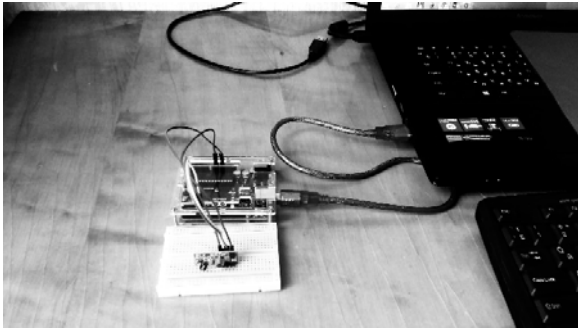


Рис. 4. Приймач радіоканалу, підключений до ноутбуку

Живлення вимірювального блоку тимчасово організовано від батареї 6F22. Остаточний вибір джерела живлення буде зроблено після тестової експлуатації.

Попередні результати тестування датчика HMC5883L разом з платою Arduino Uno та вимірювання магнітного поля на зразках дозволили виявити наступні особливості. При встановленні максимальної чутливості можливе «зашкалювання» датчика на сильно намагнічених ділянках. Але такі ділянки на реальних конструкціях можуть зустрічатися тільки як поодинокі а їх розмагнічування і перемагнічування проводиться дуже легко.

Відстань від поверхні конструкції суттєво впливає на чутливість датчика. На відстані біля 1 мм від поверхні датчик реєструє аномалії магнітного поля внаслідок наклепу на зворотному боці пластини завтовшки 4 мм. Це дозволяє зробити висновок, що окисні плівки та лакофарбові покриття, які не містять феромагнітних частин суттєво не вплинуть на результати обстежень.

Внаслідок високої чутливості датчика, та залежності результатів вимірювання від відстані до поверхні, бажано при вимірах зберігати постійний кут нахилу датчика та мінімальну відстань від поверхні конструкції. Це було вирішено шляхом створення опорної площадки. Сама плата датчика при цьому була залита епоксидною смолою для кращої ізоляції від небажаних впливів атмосфери (волога, пил, механічні впливи). Макетний зразок, який використовується для попереднього тестування МП наведено на рис. 5.



Рис. 5. Опорна поверхня датчика з елементами кріплення

Пропонується вести обстеження скерувавши вісь X датчика вздовж повздовжньої осі елементу конструкції, або іншої осі, яка легко визначається з метою «прив'язки» результатів обстеження до конкретної точки конструкції. Обстеження ведуть, спираючись площадкою на поверхню і плавно з постійною швидкістю рухаючи нею вздовж досліджуваної ділянки. При обстеженні площини крок ліній повинен складати 5 мм, що забезпечує надійне перекриття всіх ділянок.

Мінімальний час між опитуванням датчика складає 60 мс, що дає можливість отримати 16 значень магнітного поля в секунду. При швидкості руху біля 5 мм/с отримуємо надмірну точність обстеження, бо одиничний дефект впливає на магнітне поле в радіусі 1-2 мм. Тобто потенційно можна або скоротити частоту опитування датчика, або мати більше даних для статистичної обробки.

В результаті зчитування даних з датчика отримуємо ряд значень умовної інтенсивності магнітного поля по осях X, Y, Z. Формат значень є integer і він вимагає для зберігання 16 біт = 2 байти, тобто необхідно 6 байт для фіксації результатів одного вимірювання. Якщо опитуватимемо датчик з максимальною частотою потрібна швидкість передачі даних повинна бути не менш ніж 32 байти/с. Швидкість радіоканалу та записи на SD-картку практично на порядок перевищує ці значення. Місткість сучасних SD-карток дозволяє зберігати години безперервних вимірювань, навіть з урахуванням того, що потрібна буде додаткова інформація для ідентифікації файлів, зон обстеження, дати, часу обстеження, тощо.

Тому можна вважати, що при обраній конфігурації ані шина, ані процесор, ані радіоканал, ані ПЗУ не є «слабкою ланкою» МП. І загалом параметри МП є оптимальними.

Окремим і важливим питанням є інтерфейс МП та інформація, що відображається для користувача в процесі роботи.

Критичними для користувача є відомості про наявність необхідних параметрів живлення, нормальну роботу датчика, радіоканалу та ПЗУ. Це все можна вивести на дисплей в вигляді текстових повідомлень, або в вигляді піктограм при натисканні відповідної кнопки. В цій статті ми не будемо розглядати всілякі сервісні функції, а зосередимося тільки на інформації з датчика, що повинна виводитися на дисплей вимірювального модуля.

Для комфортної роботи користувач повинен мати хоча б поверхневе уявлення про параметри, які він в даний час вимірює. Як було описано вище інформація з датчика являє собою набір цілих чисел, що характеризують магнітне поле поблизу поверхні конструкції. При швидкості вимірювання 16 значень/с візуально відслідкувати зміни абсолютних значень неможливо. Навіть якщо виводити значення з меншою частотою, постає проблема вибору значень для виводу (одне значення в секунду, тобто 1 з 16, або середнє значення за якийсь проміжок

часу, або математичне очікування, тощо). Вибір рішення є досить неочевидним. До того ж більш інформативним вважається представлення даних у графічній формі.

Тому було прийнято рішення візуалізувати результати вимірювання для певного проміжку часу в вигляді діаграми/графіка на дисплеї вимірювального блоку.

Прийнято рішення про перебудову графіка через кожні 5 секунд, що дасть змогу отримати відомості про останні 80 вимірів, або при швидкості 5 мм/с про 25 мм поверхні.

Також доцільною є попередня обробка даних для їх більшої наочності.

Наприклад, значення з датчику по осях X та Y наведені на рис. 6 не дуже інформативні. Навіть додавання ліній, що ілюструє положення середнього значення не допомагає. Необхідно також враховувати, різну величину та знак вимірюваної величини, що робить розміщення всіх трьох графіків на одних осях незручним.

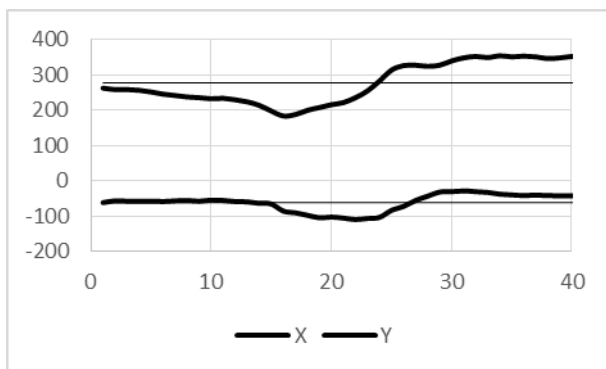


Рис. 6. Графік зміни магнітного поля в зоні наклепу

Тому було прийнято рішення використовувати нормовані значення (рис. 7) для відображення, бо зазвичай нас цікавлять саме відхилення від середнього значення, а не абсолютне значення напруженості магнітного поля.

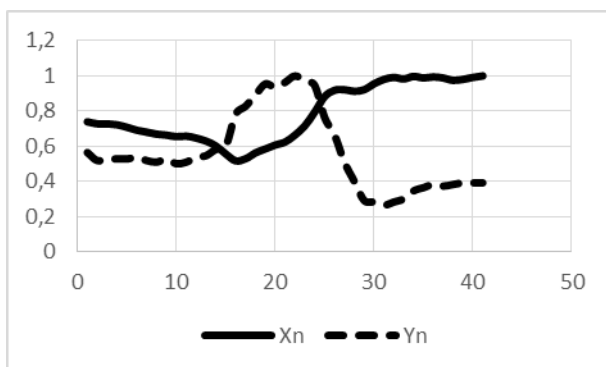


Рис. 7. Відображення нормованих значень з тими самими даними, що і на рис. 6

Як видно, аномалії проявляються більш наочно. Необхідно зазначити, що всі ці перетворення потребують обчислювальних ресурсів,

які суттєво залежать від обраних алгоритмів обробки, але апіорі обмежені можливостями контролеру. Тому кінцевий висновок про застосуванні обраного способу візуалізації буде зроблено за результатами випробувань приладу на зразках та реальних конструкціях.

### Висновки

Встановлено основні вимоги до магнітометричного приладу для визначення працездатності металокопункцій. Обрано компоновку та блоки, що входять до його складу. Визначено, що обрана конструкція та склад приладу вдовольняють вимогам дослідження, блоки сумісні і система не має «слабих ланок». За результатами тестових випробувань макетного зразка приладу встановлено оптимальний за інформативністю спосіб відображення результатів обстеження металокопункцій на вимірювальному блоці. Питання параметрів радіоканалу, джерела живлення та сервісних функцій потребують додаткового вивчення.

### Література

1. Гребенник В.М., Цапко В.К. Надежность металлургического оборудования (оценка эксплуатационной надежности и долговечности): Справочник. – М.: Металлургия, 1980. – 344 с
2. Когаев В.П., Гусенков А.Н., Бутырев Ю.И. Деформационная трещинообразование накопления усталостных повреждений при нерегулярном малоцикловом нагружении с перегрузками. – Машиноведение, 1978. – №5. – С.57-64.
3. Почтенный Е.К. Прогнозирование долговечности и динамика усталости деталей машин. – М.: Наука и техника, 1983. – 245 с
4. А.с. 15802118 СССР Способ контроля усталостной повреждаемости элементов конструкций. М. В. Карускевич, Е. Е. Засимчук, А. И. Радченко, Ю. А. Лебедев. Заявл. 10.04.89; Опубл. 30.10.89. — Бюл. № 26. — 3 с.
5. Карускевич О. М., Ігнатюк С. Р., Карускевич М. В., Хижняк С. В., Якушенко О. С. Моніторинг утоми конструкційних алюмінієвих сплавів // Вісник НАУ. — 2004. — № 1(19). — С. 88—91.
6. Gunrko L.P., Takzei G.A., Titenko A.N. Thermoelastic martensitic transformation in ferromagnetic materials and their superelastic properties // Functional Materials.-2002.-vol.9, №1.- P.75-78.
7. Білокур І.П. Основи дефектоскопії : підручник / Білокур І.П. – К. : Азімут- Україна, 2004. – 496 с.
8. Неруйнівний контроль і технічна діагностика: довідниковий посібник в 5 т. / [ред. Назарчук З.Т.]. – Львів : Фізико-мех. ін-т ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2001. -.- Т. 5.– 2001. - 1134 с.
9. Мельгуй М.А. Магнитный контроль механических свойств сталей / Мельгуй М.А. – Минск : Наука и техника, 1980. – 184 с.

### References

1. Hrebennyk V.M., Tsapko V.K. Nadezhnost' metallurhicheskoho oborudovanyya (otsenka ekspluatatsyonoy nadezhnosti i dolhovechnosti): Spravochnyk. – М.: Metallurhyya, 1980. – 344 s
2. Kohaev V.P., Husenkov A.N., Butirev Yu.Y. Deformatsionnaya traktovka nakoplenyya ustalostnykh

- povrezhde-nyy pry nerehulyarnom malotsyklovom nahruzhenyy s pere-hruzkamy. – Mashynovedenye, 1978. - #5. – S.57-64.
3. Pochtennyy E.K. Prohnozyrovanye dolhovechnosti y dynamyka ustalosty detaley mashyn. – M.: Nauka y tekhnika, 1983. – 245 s
  4. A.s. 15802118 SSSR Sposob kontrolya ustalostnoy povrezhdaemosti yelementov konstruktsyy. M. V. Karuske-vych, E. E. Zasyanchuk, A. Y. Radchenko, Yu. A. Lebedev. Zayavl. 10.04.89; Opubl. 30.10.89. — Byul. # 26. — 3 s.
  5. Karuskevych O. M., Ihnatovych S. R., Karuskevych M. V., Khyzhnyak S. V., Yakushenko O. S. Monitorynh utomy konstruktivnykh aluminievyykh splaviv // Visnyk NAU. — 2004. — # 1(19). — S. 88—91.
  6. Gungko L.P., Takzei G.A., Titenko A.N. Thermoelastic martensitic transformation in ferromagnetic materials and their superelastic properties // Functional Materials.-2002.-vol.9, #1.- P.75-78.
  7. Bilokur I.P. Osnovy defektoskopiyi : pidruchnyk / Bi-lokur I.P. – K. : Azimut- Ukrayina, 2004. – 496 s.
  8. Neruynivnyy kontrol' i tekhnichna diahnozyka: do-vidnykovyy posibnyk v 5 t. / [red. Nazarchuk Z.T.]. – L'viv : Fyzyko-mekh. in-t im. H.V. Karpenka NAN Ukrayiny, 2001. - .- T. 5.- 2001. - 1134 s.
  9. Mel'huy M.A. Mahnytniy kontrol' mekhanicheskyykh svoystv staley / Mel'huy M.A. – Mynsk : Nauka y tekhnika, 1980. – 184 s.

**Жидков А.Б., Марченко Д.М. Магнітометричний прилад нового покоління для оцінки працездатності металоконструкцій**

*Викладено основні принципи побудови магнітометричного пристрою для визначення працездатності металоконструкцій на підставі визначення ступеню втомних пошкоджень. Наведено*

*основні вимоги до пристрою, обґрунтовано вибір всіх вузлів пристрою, описано принцип його роботи та наведено блок-схему. Представлені попередні результати використання пристрою. Описано принципи візуалізації результатів вимірювання для оперативного контролю результатів вимірювання.*

**Ключові слова:** *втомні пошкодження, магнітні властивості, прилад, вузли, візуалізація*

**Zhidkov A.B., Marchenko D.M. Magnetometric new generation device for determining the operability of metal structures**

*The basic principles of magnetometric device for assessing the performance of metal structures co-determination on the basis of the degree of fatigue-damage researches. The basic requirements for device-grounded Vano select all units of the device, describes how it works and presents a flowchart. Presented preliminary results of use. Describe the measurement principles of visualization for operational control of measurement results.*

**Keywords:** *fatigue damage, magnetic properties, device nodes, visualization*

**Жидков А.Б.** к.т.н., доц., директор ВП «НДІ «Іскра» Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, [zhand.cmw@ukr.net](mailto:zhand.cmw@ukr.net)  
**Марченко Д.М.** д.т.н., проф., зав. каф. КтАКС Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, [marchenko\\_d\\_n@mail.ru](mailto:marchenko_d_n@mail.ru)

*Рецензент: Осенін Ю.І., д.т.н., проф.*

Стаття подана 15.11.2015.

УДК 621.9.06

## ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕСУЩЕЙ СИСТЕМЫ МНОГООПЕРАЦИОННОГО СТАНКА

Кроль О.С.

## EVALUATION OF DYNAMIC CHARACTERISTICS CARRYING SYSTEM OF MULTISOPERATION MACHINE

Krol O.S.

*Приведено решение задачи анализа динамических характеристик несущей системы многооперационного станка модели СФ68ПФ4. Определены узловые перемещения режущего инструмента и заготовки и рассмотрен баланс податливости основных формообразующих узлов. Дана оценка динамических характеристик внешних случайных воздействий на первых двух собственных частотах колебаний.*

**Ключевые слова:** несущая система, многооперационный станок, динамическая податливость, MATLAB

**Введение.** Увеличение производительности и эффективности процессов изготовления деталей связано с повышением динамической устойчивости металлорежущих станков. Анализ баланса податливости и форм колебаний деталей и сборочных единиц станков фрезерно-сверлильно-расточной группы показал, что наиболее интенсивные колебания характерны для основных формообразующих узлов: шпиндельная головка – оправка – инструмент и стол – заготовка. Такие операции с прерывистым резанием как фрезерование характеризуются большим диапазоном силовых воздействий, возникающим в процессе обработки, включая вероятностную составляющую в виде совокупности динамических гармоник.

В работах посвященных вопросам исследования фрезерных станков [1, 2] спектральные составляющие зачастую не учитывались при построении моделей динамики упругих систем станков. При этом анализ случайных процессов при резании осуществляется численными методами с использованием аппарата спектрального анализа и алгоритмов быстрого преобразования Фурье [3]. Эффективность этой процедуры обеспечивается использованием модуля Signal Processing, входящего в математическую среду MatLab [4].

**Целью данной работы** является повышение динамического качества функционирования формообразующих узлов станка СФ68ВФ4 с учетом баланса податливости его упругой системы и

моделирования функционирования системы при входных сигналах полигармонического типа.

**Изложение основного материала.** В качестве объекта исследования рассматривается широкоуниверсальный станок фрезерно-сверлильно-расточной группы модели СФ68ВФ4, 3D-модель которого построена в САПР КОМПАС-3D (рис.1). Этот станок с успехом может применяться как в единичном, так и в мелкосерийном и серийном производствах. Станок модели СФ68ВФ4 предназначен для комплексной обработки деталей из стали, чугуна, цветных металлов и сплавов, пластмасс, для нужд народного хозяйства. Благодаря механизму перебора в сочетании с электродвигателем с бесступенчатым регулированием обеспечивает 24 скорости вращения шпинделя.

В отличие от других моделей фрезерных станков, станок модели СФ68ВФ4 на базе которого разрабатывается проектируемый станок имеет кинематические цепи главного привода на горизонтальный и вертикальный шпиндель, кинематические цепи коробки подач по координатам X,Y,Z, кинематические цепи привода по координате В (поворот планшайбы), кинематические цепи приставных устройств; долбежной и угловой головки (рис. 2).

Станок монтируется на чугунном основании на котором закреплена колонна, на которой монтируются все основные части станка.

По горизонтальным направляющим колонны перемещается бабка шпиндельная (ось "Z"), к которой крепится вертикальная и угловая головка или дополнительные устройства и приспособления.

По вертикальным направляющим колонны перемещается суппорт (ось "Y"), а по его горизонтальным направляющим основной вертикальный стол (ось "X"), к которому крепится, в зависимости от комплектации, жесткий угловой стол или поворотный стол для установки на них обрабатываемых деталей.

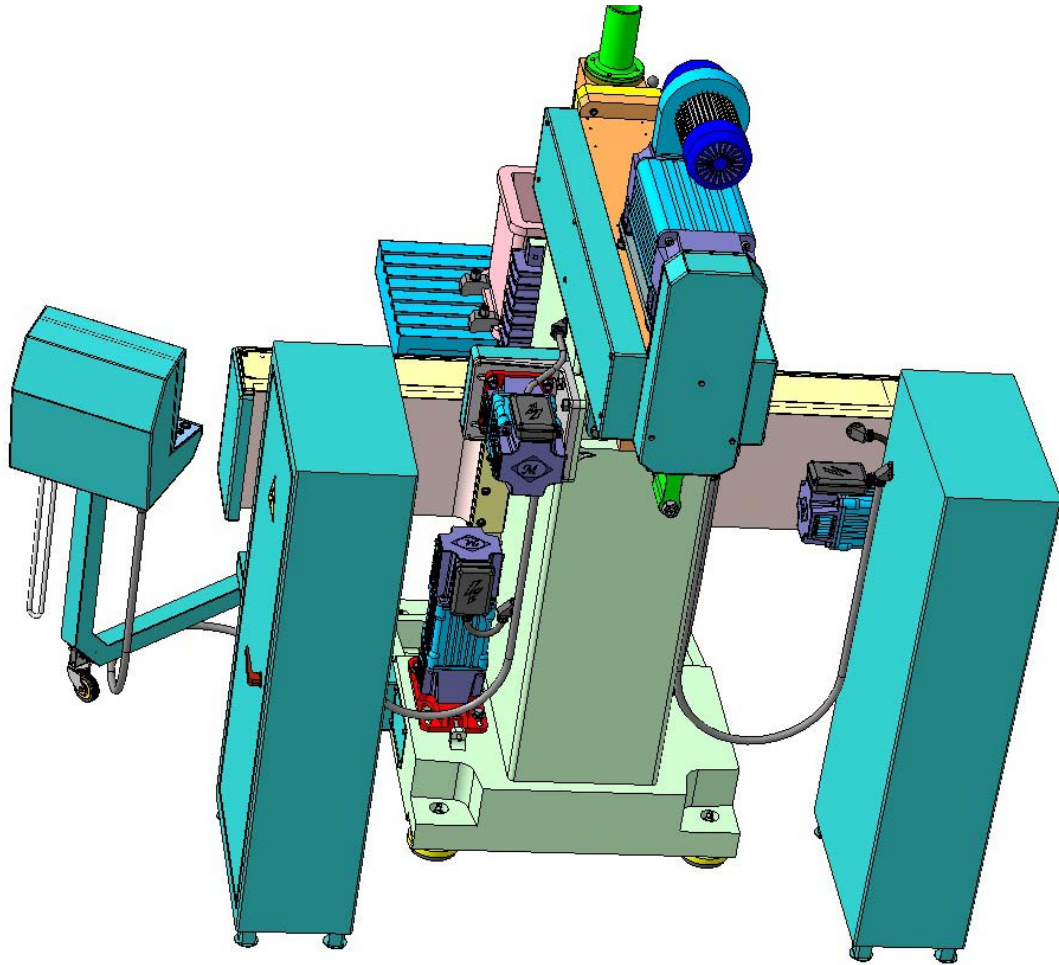


Рис.1. Конструкція станка моделі СФ68ВФ4

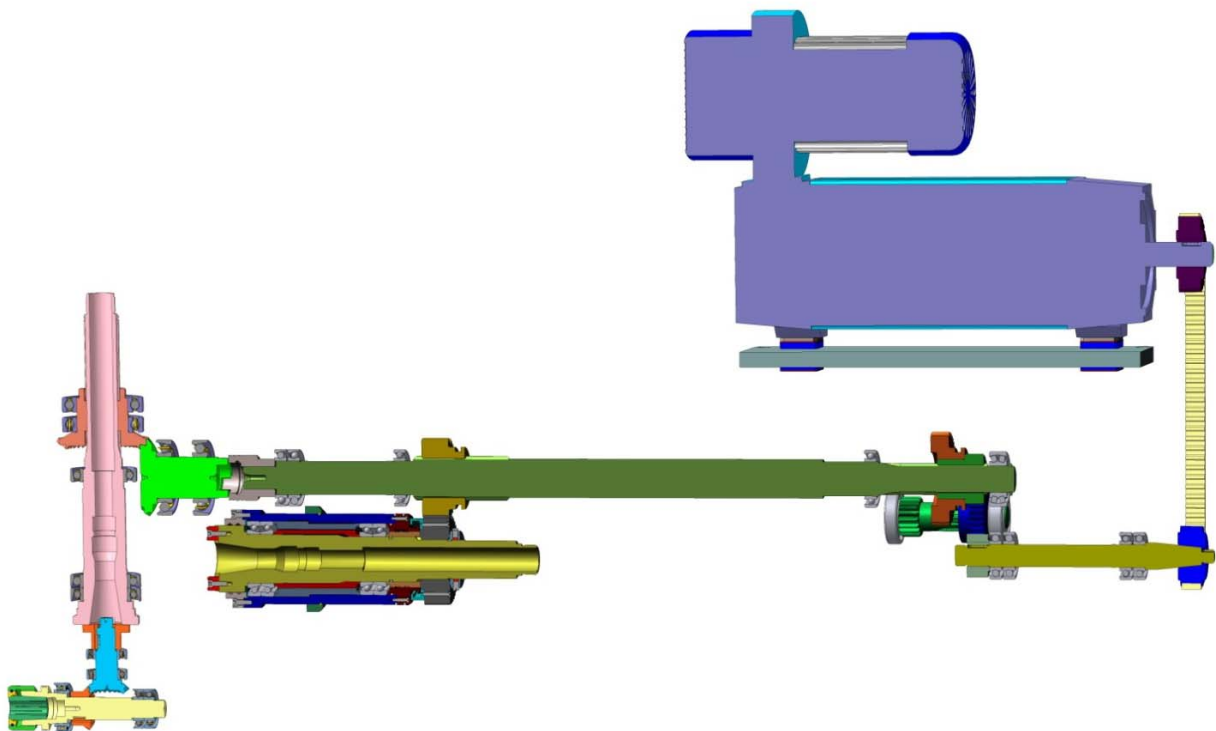


Рис.2. Кинематика станка моделі СФ68ВФ4

В верхней части колонны с левой стороны находится съемник, на котором устанавливается вертикальная головка в не рабочем положении.

Слева, у основания, размещен бак СОЖ с электронасосом, справа, на колонне, закреплена станция смазки. Пульт управления крепится посредством поворотного кронштейна к основанию.

Комплект шкафов (шкаф гидроаппарата, приводов и электроавтоматики) закреплены непосредственно на задней стенке колонны (рис.1).

Упругая система может быть представлена в виде линейной системы со многими степенями свободы и включает некоторое количество сосредоточенных и распределенных элементов, обладающих соответствующими инерционными, упругими и диссипативными характеристиками.

Во время предварительных экспериментов на базовой модели СФ68ВФ4 получены: перемещение инструмента в угловой головке и заготовки, установленной на угловом столе под действием веса узлов и силами  $P_{x,y,z}$ . При этом была учтена самая неблагоприятная схема расположения узлов несущей системы станка – шпиндель в самом крайнем положении; стол с заготовкой в самом нижнем положении.

Для оценки влияния параметров упругой системы на уровень динамической податливости необходимо построение форм колебаний на тех собственных частотах, которые характеризуются относительно высоким уровнем колебаний инструмента и заготовки. Анализ экспериментальных амплитудно-частотных характеристик показал, что наибольший интерес представляют низкочастотные колебания  $f_i$  (Гц):

$$f_i = \{ 16,5; 20,2; 24,6; 28,6; 44,2 \}.$$

На указанных частотах были рассчитаны формы колебаний несущей системы, численные

значения которых для инструмента и заготовки приведены в табл.1.

В данной таблице указаны численные значения линейных перемещений по осям X,Y,Z (мм) и угловых перемещений относительно осей  $F_x, F_y, F_z$  (мкм/мм).

На рис.3 графически представлены формы колебаний на частоте 28,6 Гц, характеризующихся интенсивными перемещениями шпиндельной бабки с поворотной головкой в плоскости YOZ и стола с заготовкой в плоскости XOZ.

В данной таблице указаны численные значения линейных перемещений по осям X,Y,Z (мм) и угловых перемещений относительно осей  $F_x, F_y, F_z$  (мкм/мм).

На рис.3 графически представлены формы колебаний на частоте 28,6 Гц, характеризующихся интенсивными перемещениями шпиндельной бабки с поворотной головкой в плоскости YOZ и стола с заготовкой в плоскости XOZ. При этом фиксировались упругие деформации при наиболее неблагоприятной схеме расположения узлов станка и следующем варианте нагружения:

$$P_{zI} = -164,0 \text{ Н}; \quad P_{yI} = P_{xI} = 164,0 \text{ Н (приложены на конце шпинделя)}.$$

При программном методе испытаний [2] возможно наложение динамической составляющей на статическое значение силы и воспроизведение большого диапазона силовых воздействий возникающих в процессе обработки. При этом сила резания  $P$  состоит из постоянной (статической) составляющей  $P_0$  и совокупности динамических гармоник с амплитудой  $P_i$  и частотой  $\omega_i$ :

$$P = P_0 + \sum_i P_i \sin \omega_i t.$$

Таблица 1

Узловые перемещения

Узел	Направление	Собственные частоты, Гц					
		16,5	20,2	24,6	28,6	40,9	44,2
Режущий инструмент	X	-0,02	-0,021	0,032	0,0063	0,0015	0,04
	Z	-0,013	-0,018	0,016	0,028	0,0034	0,02
	Y	-0,012	-0,027	0,03	0,0036	0,001	0,012
	$F_x$	$-0,26 \cdot 10^{-5}$	$0,48 \cdot 10^{-5}$	$0,11 \cdot 10^{-4}$	$-0,34 \cdot 10^{-4}$	$0,2 \cdot 10^{-6}$	$0,22 \cdot 10^{-4}$
	$F_z$	$-0,14 \cdot 10^{-4}$	$-0,35 \cdot 10^{-4}$	$0,54 \cdot 10^{-4}$	$0,53 \cdot 10^{-5}$	$0,32 \cdot 10^{-6}$	$0,27 \cdot 10^{-4}$
	$F_y$	$0,21 \cdot 10^{-4}$	$0,13 \cdot 10^{-4}$	$0,79 \cdot 10^{-6}$	$0,19 \cdot 10^{-4}$	$0,61 \cdot 10^{-7}$	$0,72 \cdot 10^{-4}$
Заготовка	X	0,17	-0,031	-0,035	$0,57 \cdot 10^{-3}$	$-0,14 \cdot 10^{-4}$	0,047
	Z	0,065	-0,1	-0,04	-0,021	$-0,63 \cdot 10^{-4}$	0,046
	Y	0,037	-0,11	-0,034	0,036	$-0,1 \cdot 10^{-3}$	0,053
	$F_x$	$-0,64 \cdot 10^{-5}$	$0,78 \cdot 10^{-4}$	$0,23 \cdot 10^{-4}$	$0,15 \cdot 10^{-4}$	$-0,23 \cdot 10^{-6}$	$-0,96 \cdot 10^{-4}$
	$F_z$	$-0,1 \cdot 10^{-3}$	$-0,12 \cdot 10^{-3}$	$0,42 \cdot 10^{-4}$	$-0,56 \cdot 10^{-4}$	$-0,2 \cdot 10^{-6}$	$-0,18 \cdot 10^{-4}$
	$F_y$	$0,14 \cdot 10^{-3}$	$-0,89 \cdot 10^{-4}$	$0,41 \cdot 10^{-4}$	$-0,51 \cdot 10^{-4}$	$-0,65 \cdot 10^{-6}$	$-0,29 \cdot 10^{-4}$

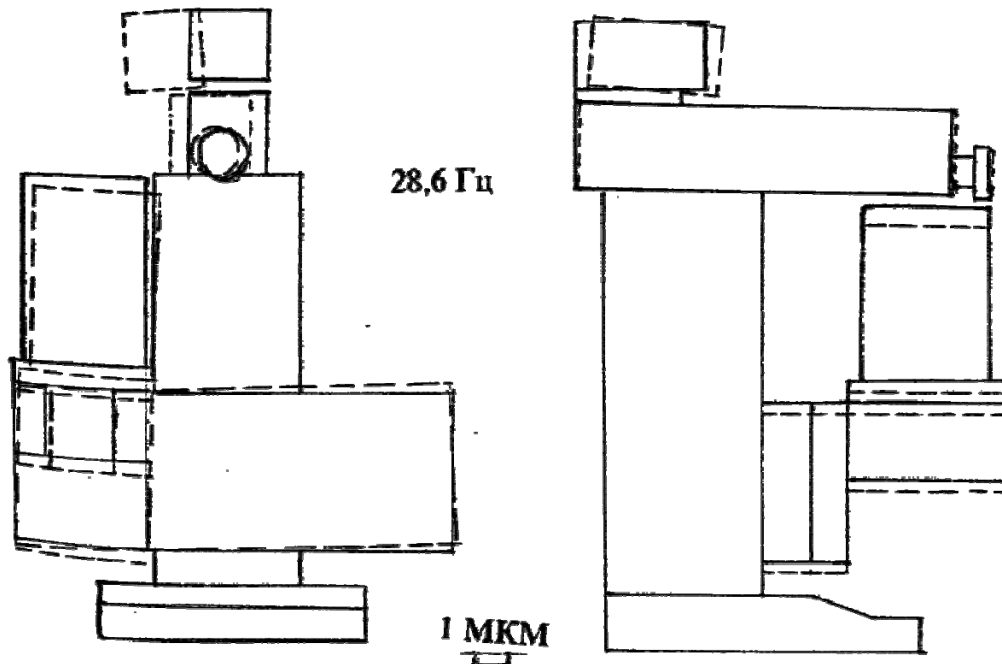


Рис. 3. Формы колебаний несущей системы

Обычно динамическая составляющая воспроизводится в виде простого синусоидального процесса, хотя при резании изменение сил во времени имеет более сложный характер. При формировании зависимости  $P_i=f(t)$  необходимо оценить дисперсию и математическое ожидание сигнала, предназначенного для измерения силы резания. Кроме того, при реализации спектрального анализа, учитывается случайная составляющая типа “белый шум” и др [3].

Рассмотрим динамические характеристики внешних случайных воздействий  $P_i(t)$  на первых двух частотах  $\{f_1=20 \text{ Гц}; f_2=28 \text{ Гц}\}$ , задавая при этом следующие параметры:

1) интервал и дискретность временной оси:  
 $t = 0 : 0,001 : 0,6 ;$

2) зависимость  $P_i = f(t)$  в виде полигармонического сигнала:

$$P_i = P_1 \sin \omega_1 t + P_2 \sin \omega_2 t ,$$

где  $P_1$  и  $P_2$  - амплитуды гармонических колебаний.

Частоты  $\omega_1$  и  $\omega_2$  могут быть заданы через некоторую частоту  $\omega$  так, что  $\omega_1 = 5 \cdot \omega ; \omega_2 = 7 \cdot \omega$  и сумма будет периодической функцией с периодом  $2\pi/\omega = \pi/2$ .

Форма сигнала, содержащая частоты 20 Гц и 28 Гц :

$$P_i(t) = 246 \sin (2\pi \cdot 20t) + 109 \sin(2\pi \cdot 28t);$$

3) случайной составляющей типа “белый шум” с помощью команды “rand(‘normal’)”[4] с нулевым средним и “единичной дисперсией”;

4) объединенного сигнала, полученного путем наложения случайной составляющей на статическую:

$$y_i(t) = P_i + 2 \text{ rand } (t) ;$$

5) спектральной плотности  $P_{yy}(i\omega)$  :

$$p_{yy}(i\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\bar{y}_i(i\omega) \cdot \bar{y}_i^*(i\omega)}{2T} ,$$

где  $\bar{y}_i(i\omega) = \bar{y}_i^*(-i\omega)$  - комплексно-сопряженные функции, представляющие преобразование Фурье для функции  $y_i(t)$ .

Для графической интерпретации случайной функции и идентификации частотных компонент воспользуемся дискретным преобразованием Фурье, которое дает выражение линейного спектра дискретной периодической функции.

При числе отсчетов  $N=256$  (256-точечное быстрое преобразование Фурье (БПФ)) реализовать БПФ сигнала  $y_i(t)$  можно с помощью Matlab-команды fft:

$$y = \text{fft} ( y_i(t), 256)$$

6) первых 128 точек (другие 128 точек симметричны) энергетического спектра  $P_{yy}(i\omega)$ , представленных графически на оси частот с помощью команд :

$$f = 1000 \cdot (0:127)/256; \\ \text{plot} (f, P_{yy}(i\omega)(1:128)).$$

На рис. 4, а представлен график случайной функции  $P_i(t)$  представляющий собой суперпозицию полезного синусоидального сигнала и “белого

шума” с нормальным распределением. Как правило, из-за высокого уровня шумов нельзя применить частотный и другие методы исследований, вместе с тем такого рода задача может быть решена на основе функций симметричной плотности [3]. На рис. 4,б представлен график спектральной плотности  $S_p(i\omega)$ , для которого уменьшение эффекта наложения частот и искажение спектра достигается за счет сокращения шага дискретизации и фильтрации шумовых высокочастотных составляющих.

Графическое представление деформаций упругих звеньев фрезерно-сверлильно-расточных станков позволяет более четко ориентироваться на первой стадии расчетов и следовательно повысить качество окончательных расчетов. Учет случайных составляющих входных сигналов системы делает процедуру моделирования более эффективной и позволяет определить картину динамического взаимодействия в широком диапазоне входных характеристик.

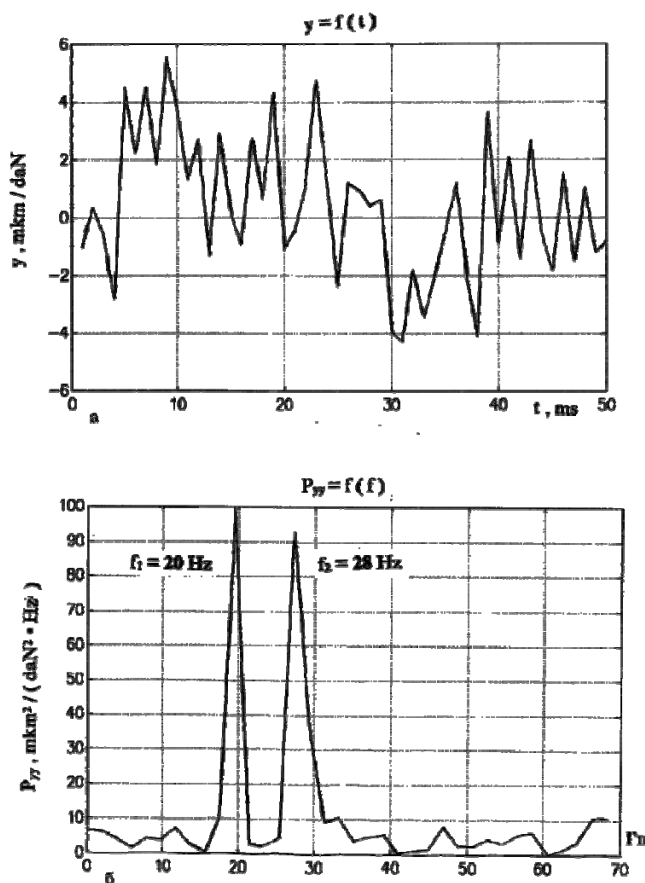


Рис. 4. Спектральные характеристики входного параметра системы: а – график случайной функции  $P_f(t)$ ; б – график спектральной плотности  $S_p(i\omega)$

**Выводы.** 1. Сформирован баланс перемещений формообразующих звеньев несущей системы станка модели СФ68ВФ4, и определены узловые перемещения режущего инструмента и заготовки в

направлениях координатных осей X, Y, Z под действием системы сил резания при фрезеровании.

2. Определены собственные частоты колебаний несущей системы станка и построены формы колебаний на тех собственных частотах, которые характеризуются относительно высоким уровнем вибраций инструмента и заготовки. На базе анализа экспериментальных амплитудно-частотных характеристик показано, что наибольший интерес представляют низкочастотные колебания.

3. Исследованы динамические характеристики внешних случайных воздействий на первых двух собственных частотах колебаний. Синтезирована случайная составляющая типа “белый шум” с помощью команды “rand(‘normal’)” в программной среде «Signal processing».

4. Построены графики случайной функции и спектральной плотности с использованием операции суперпозиции полезного синусоидального сигнала и “белого шума” с нормальным распределением.

#### Л и т е р а т у р а

1. Кудинов В.А. Динамика станков / В.А. Кудинов. – М.: Машиностроение, 1967. – 360 с.
2. Каминская В.В. Расчетный анализ динамических характеристик несущей системы станка / В.В. Каминская, А.В. Гринглаз // Станки и инструмент, 1989. – №2. – С. 10–13.
3. Солодовников А.И. Основы теории и методы спектральной обработки информации / А.И. Солодовников, А.М. Спиваковский. – Л.: ЛГУ, 1986. – 272 с.
4. Иглин С.П. Математические расчеты на базе Matlab/С.П.Иглин. – Издательство “ВНУ-Санкт-Петербург” 2005. – 640 с.

#### References

1. Kudinov V.A. Dinamika stankov / V.A. Kudinov. – M.: Mashinostroenie, 1967. – 360 s.
2. Kaminskaja V.V. Raschetnyj analiz dinamicheskikh harakteristik nesushhej sistemy stanka / V.V. Kaminskaja, A.V. Gringlaz // Stanki i instrument, 1989. – №2. – S. 10–13.
3. Solodovnikov A.I. Osnovy teorii i metody spektral'noj obrabotki informacii / A.I. Solodovnikov, A.M. Spivakovskij. – L.: LGU, 1986. – 272 s.
4. Iglin S.P. Matematicheskie raschety na baze Matlab/S.P.Iglin. – Izdatel'stvo “ВНУ-Санкт-Петербург” 2005. – 640 s.

**Кроль О.С. Оцінка динамічних характеристик несучої системи багатоопераційного верстата**

*Наведено рішення задачі аналізу динамічних характеристик несучої системи багатоопераційного верстата моделі СФ68ПФ4. Визначено вузлові переміщення ріжучого інструменту і заготовки і розглянутий баланс податливості основних формотворчих вузлів. Дана оцінка динамічних характеристик зовнішніх випадкових впливів на перших двох власних частотах коливань.*

**Ключові слова:** несуча система, багатоопераційний верстат, динамічна податливість, MATLAB.

**Krol O.S. Evaluation of dynamic characteristics carrying system of multioperation machine**

*The solution of problems for analysis of dynamic characteristics to the support system multioperational machine model SF68VF4. Identified nodal displacements of the cutting tool and the workpiece and considered balance compliance basic formative nodes. The estimation of dynamic characteristics of random external influences on the first two natural frequencies of oscillation.*

**Keywords:** carrying system, multioperational machine, dynamic compliance, MATLAB.

**Кроль Олег Семенович** – к.т.н., доцент, професор кафедри машинобудування, верстатів та інструментів Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, [krolos@yandex.ru](mailto:krolos@yandex.ru)

*Рецензент:* **Соколов В.І.**, д.т.н., професор

Стаття подана 06.10.2015.

УДК 621.9.06

### 3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА УГЛОВОЙ ГОЛОВКИ МНОГООПЕРАЦИОННОГО СТАНКА

Кроль О.С., Хмельницкий А.В.

### 3D-MODELLING TO SPINLE'S NODE OF ANGULAR HEAD FOR MULTYOPERATION TOOL

Krol O.S., Khmelnitsky A.V.

*Приведено решение задачи построения трехмерных моделей шпиндельного узла многооперационного станка модели СФ68ПФ4, с использованием модуля АРМ FEM, интегрированного в САПР КОМПАС-3D. Получены оценки напряженно-деформированного состояния, позволяющие наметить пути совершенствования конструкции двухопорного шпиндельного узла*

**Ключевые слова:** угловая головка, шпиндельный узел, твердотельная модель, САПР КОМПАС, модуль АРМ FEM

**Введение.** Эффективные редакторы 3D-моделирования внедряются в практику станкостроения. В последнее время прогрессирует интегрированная САПР КОМПАС 3D [1, 2], оснащенная собственным параметризатором и модулем исследования напряженно-деформированного состояния АРМ FEM, использующим метод конечных элементов [3].

Наряду с геометрическим моделированием необходимо проведение всестороннего инженерного анализа проектируемого объекта с использованием инструментов CAE-анализа, а также осуществление комплекса расчетов по критериям прочности и жесткости. Нужны программы дающие представления о напряженно-деформированном состоянии формообразующих деталей и узлов станка. Такой программный комплекс представляет известная CAD/CAE система АРМ WinMachine [4].

Начиная с версии КОМПАС 3D v.13 в ее состав интегрирован модуль АРМ FEM, являются составной частью единой среды проектирования и анализа с использованием ассоциативной геометрической модели, единой библиотеки материалов и общего с КОМПАС-3D интерфейса [5].

**Целью данной работы** является повышение эффективности процедур исследования технико-экономических свойств формообразующих изделий за счет построения твердотельных моделей шпиндельных узлов и оценки упруго-деформационных характеристик шпинделей

многооперационных станков, оснащенных модульной оснасткой.

#### **Изложение основного материала.**

Эффективность процесса создания металлорежущих станка зависит от уровня качества формообразующих узлов [6, 7]. Шпиндельный узел (ШУ) являющийся исполнительным органом несущей системы станка, оказывает решающее влияние на жесткость, виброустойчивость и производительность станка в целом. Оценка точности шпиндельного узла осуществляется с учетом той части, которую вносит ШУ в суммарную погрешность обработки. Эти исследования показали, что в формировании показателей точности взаимного расположения поверхностей и точности формы влияние шпиндельного узла составляет соответственно 50...80 % и 60...90 % в общем распределении точности станка.

Для анализа работоспособности конструкции, выбора оптимального варианта проекта и его исследования методом конечных элементов создана 3D-модель станка СФ68ПФ3 (рис. 1) с угловой шпиндельной головкой (рис. 2) в САПР КОМПАС-3D [8].

Угловая головка станка СФ68 позволяет расширить технологические возможности фрезерно-сверлильно-расточных станков. Угловая головка используется для обработки уступов и пазов, расположенных в труднодоступных участках заготовок плоскостей. Она реализует высокопроизводительную обработку при частотах вращения шпинделя до 4000 мин<sup>-1</sup> с возможностью угла поворота шпинделя на 360° в горизонтальной плоскости. Движение от вертикального шпинделя на шпиндель головки угловой передается через коническую передачу. Наиболее характерной операцией, осуществляемой с помощью угловой головки, является фрезерование плоскостей, пазов и уступов концевой фрезой. Данный типоразмер головки оснащается набором концевых фрез с диаметром в диапазоне 3 ... 25 мм. Для таких фрез

характерны предельные режимы:  $s_z = 0,05 \dots 0,1$  мм/зуб;  $t = 4 \dots 8$  мм. При таких режимах, в соответствии со справочником технолога, главная составляющая силы фрезерования составляет:

$$P_{z\phi} = \frac{10 \cdot C_p t^x s_z^y B^u z}{D^q n^w},$$

где:  $C_p = 12,5$ ;  $x = 0,85$ ;  $y = 0,75$ ;  $u = 1,0$ ;  $q = 0,73$ ;  $w = -0,13$ ;

$B = D/1,5 = 17$  мм – ширина фрезерования;

$Z = 5$  – для фрез с нормальным зубом;

$D = 25$  мм – наибольший диаметр фрезы;

$n = 800$  мин<sup>-1</sup>;

С учетом перечисленных выше данных сила равна  $P_{z\phi} = 2516$  Н.

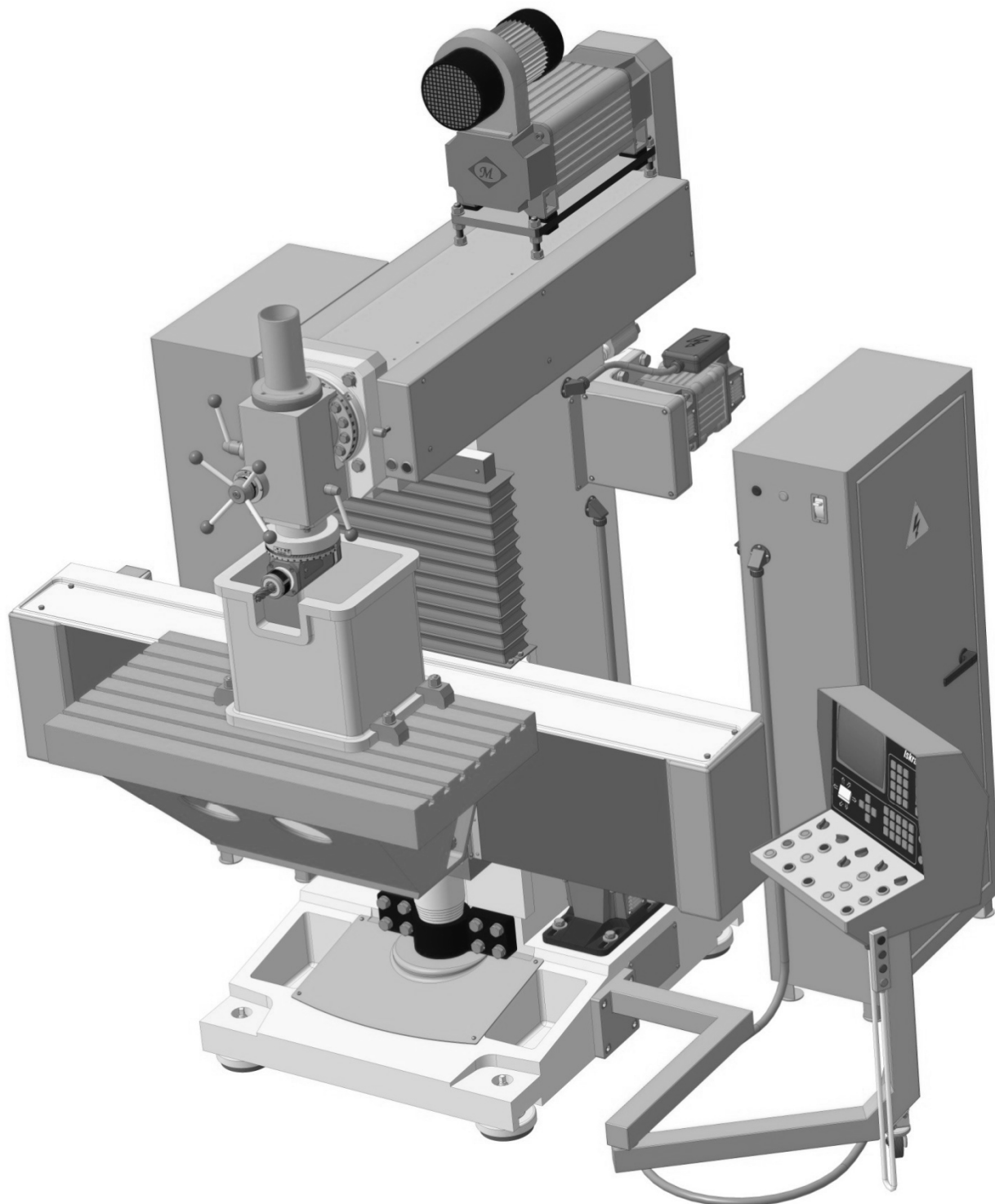


Рис. 1. 3D модель станка СФ68ПФ3

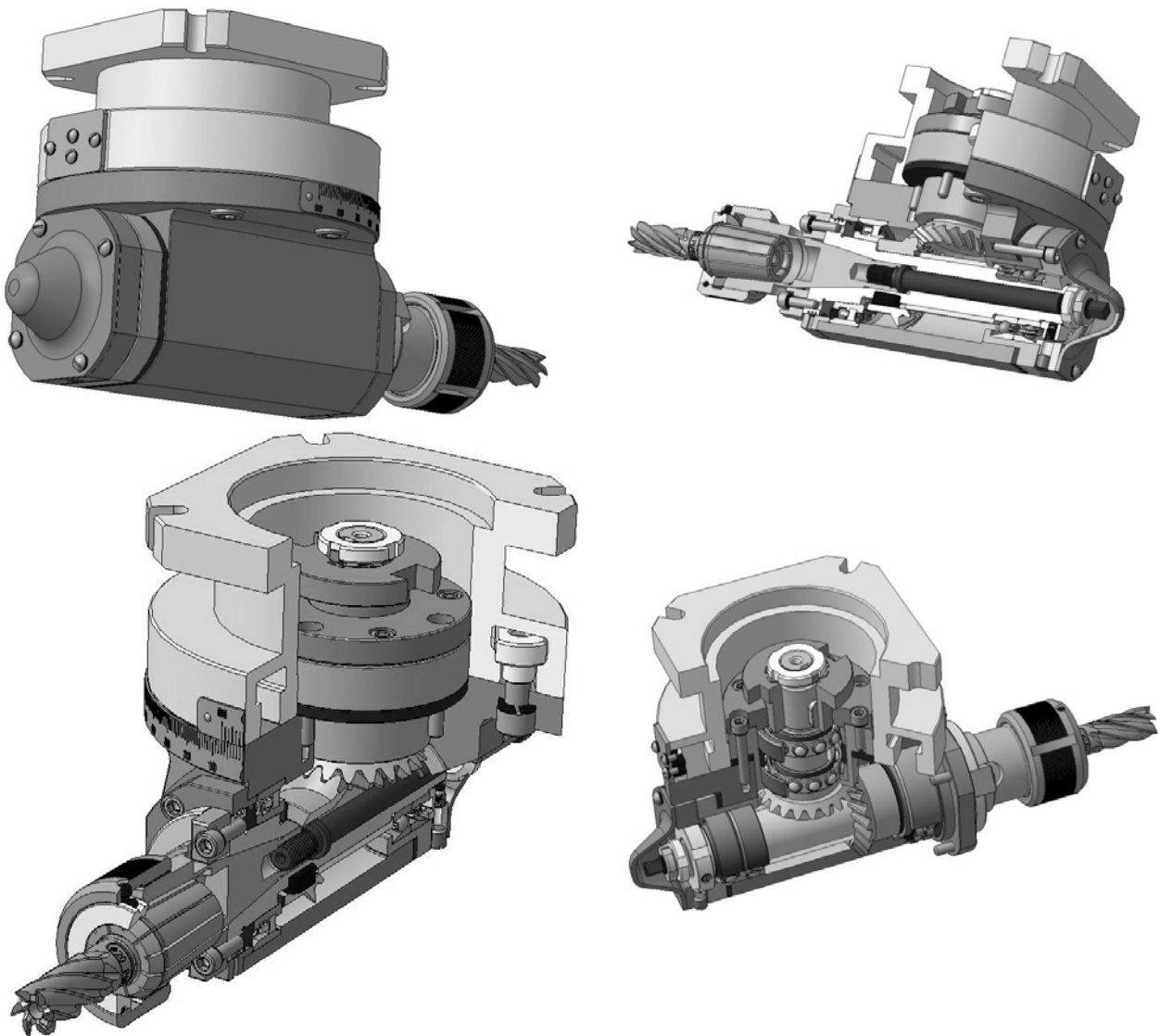


Рис. 2. 3D модель угловой головки

Для принятой схемы несимметричного попутного фрезерования существуют соотношения между окружной  $P_{z\phi}$  составляющей с одной стороны и горизонтальной  $P_h$ , вертикальной  $P_v$ , радиальной  $P_{y\phi}$  и осевой  $P_{x\phi}$  составляющих с другой:

$$P_h : P_{z\phi} = 0,2 \dots 0,3; P_v : P_{z\phi} = 0,9 \dots 1,0;$$

$$P_{y\phi} : P_{z\phi} = 0,3 \dots 0,4; P_{x\phi} : P_{z\phi} = 0,5 \dots 0,55 (\varphi \neq 90^\circ).$$

В соответствии с этими соотношениями получим следующие численные значения составляющих сил резания при концевом фрезеровании:

$$P_h = 755 \text{ Н}; P_v = 2265 \text{ Н}; P_{y\phi} = 910 \text{ Н}; P_{x\phi} = 0.$$

Крутящий момент при фрезеровании можно определить по формуле:

$$M_{кр} = \frac{P_{z\phi} D_{\phi p}}{2} = 31,46 \text{ Нм}.$$

При составлении расчетных схем шпинделя угловой головки в двух взаимно перпендикулярных плоскостях следует учесть следующие соотношения:

$$\text{- в вертикальной плоскости } P_v \leftrightarrow P'_y = P_z;$$

$$\text{- в горизонтальной плоскости } P_h \leftrightarrow P'_x = P_x$$

$$\text{Шпиндель: сталь 40X; } E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа;}$$

$$\sigma_B = 950 \text{ МПа; } \tau_T = 785 \text{ МПа; } n = 800 \text{ мин}^{-1};$$

$$T = 5000 \text{ ч}.$$

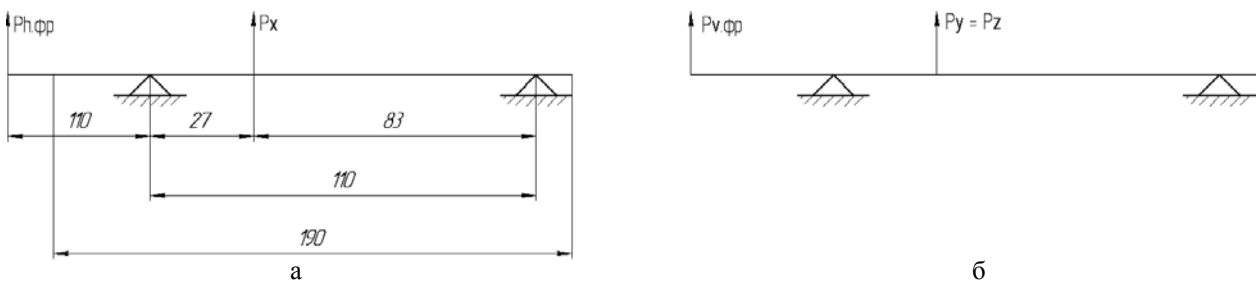


Рис. 3. Расчетная схема шпинделя угловой головки:  
а – в горизонтальной плоскости, б – в вертикальной плоскости

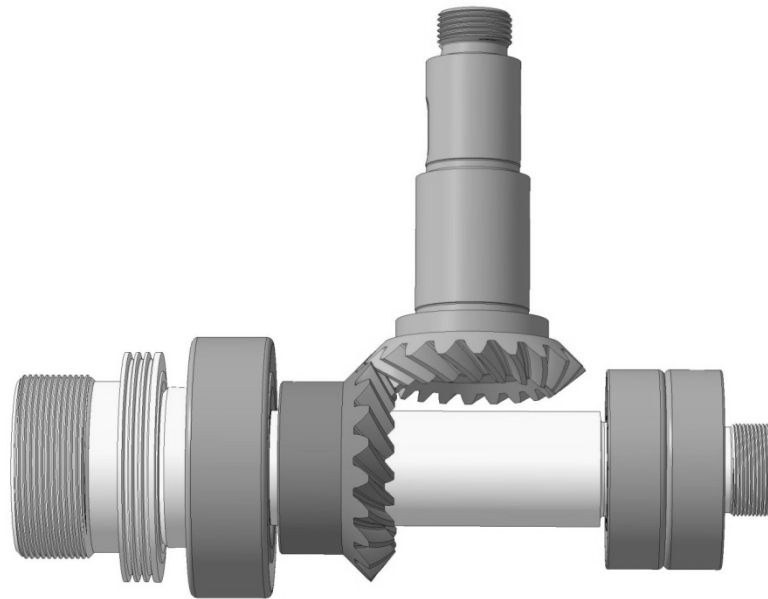


Рис. 4. Трехмерные модели деталей шпиндельного узла на двух опорах

Момент сопротивления поперечного сечения шпинделя определяется в соответствии с зависимостью

$$W_p = \frac{M_{\text{ин}}}{\sigma_s} = \frac{260}{980 \cdot 10^6} = 2,74 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^4.$$

Диаметр шпинделя  $d$  при расчете по критерию прочности принимает значение:  $d=32$  мм.

Шпиндель угловой головки монтируется на двух опорах:

Передняя - подшипник 3182108 - роликовый радиальный двухрядный с короткими цилиндрическими роликами с коническим отверстием внутреннего кольца с бортами на внутреннем кольце. Направление воспринимаемых нагрузок - радиальное. Допускают регулировку радиального зазора. Подшипник соответствует стандарту ГОСТ 7634-75.

Задняя: – подшипник 246205 - шариковый радиально-упорный сдвоенный, наружные кольца которого обращены друг к другу широкими торцами, угол контакта  $\alpha=26^\circ$ . Направление

воспринимаемых нагрузок - радиальное и осевое в обе стороны. Комплект подшипников фиксирует вал и корпус в обоих осевых направлениях и обеспечивает более жесткую угловую фиксацию вала чем соответствующий подшипник 346205. Подшипник соответствует стандарту ГОСТ 832-78.

В процессе построения сложных 3D-сборок было выполнено построение 3D-моделей деталей и узлов, входящих в шпиндельный узел (рис. 4).

Комплексный инженерный анализ напряженно-деформированного состояния шпинделя станка СФ68 (рис. 5, а) осуществим с помощью модуля АРМ FEM [3], оснащенного генератором конечно-элементной сетки, входящим в САЕ - библиотеку, которая реализует решения инженерных задач методом конечных элементов (МКЭ). В процессе проектирования осуществляется крепление в передней и задней опорах и задаются прикладываемые нагрузки (рис. 5, б); определяются совпадающие грани (для КЭ-анализа сборки); осуществляется генерация КЭ-сетки (рис. 5, в) методом МТ Frontal (с использованием многоядерности процессора); выполняется расчет и

просмотр результатов в виде карт напряжений и перемещений. В процессе МКЭ имеется возможность оценки и анализа разбиения при различных величинах глубины просмотра (рис. 5, г).

В рамках модуля АРМ FEM осуществлены все вышеперечисленные действия и получены:

- поля эквивалентных напряжений по Мизесу (четвертая теория прочности), представленных на рис. 6;

- поля перемещений (рис. 7) на множестве сечений шпинделя;

- коэффициент запаса прочности по пределу текучести (рис. 8).

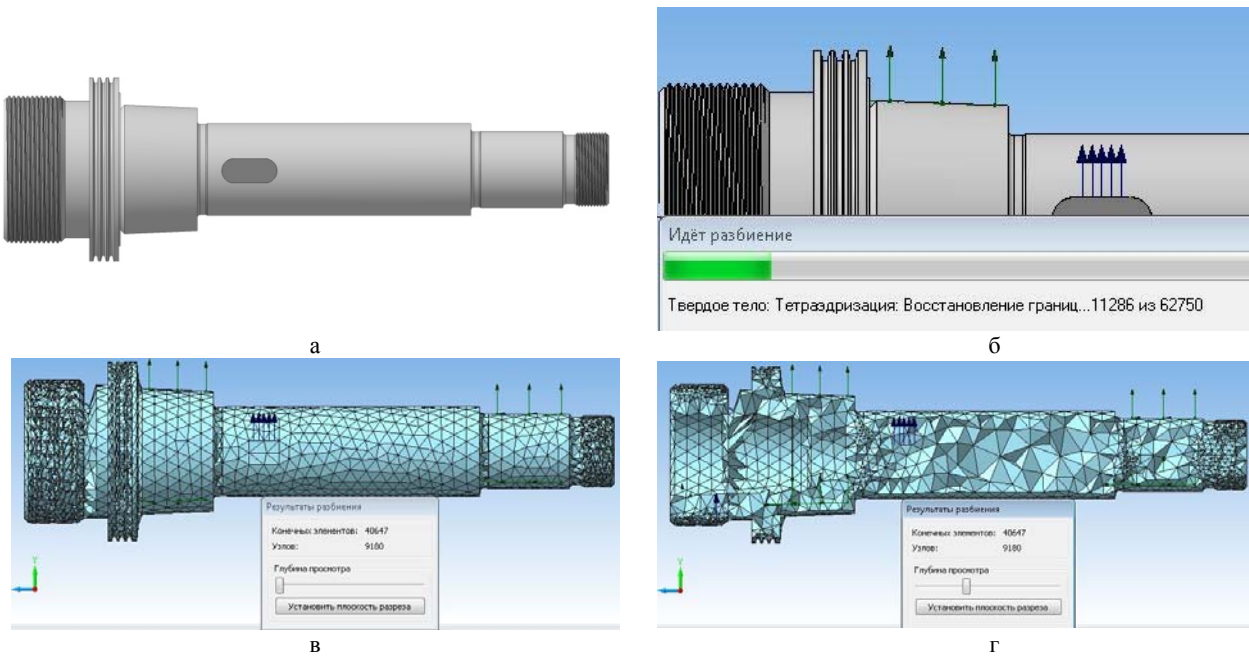


Рис. 5. Процедуры метода конечных элементов: а – 3D модель шпинделя; б – опоры и нагрузки, действующие на шпиндель; в – конечно-элементная сетка; г – глубина просмотра

**Результаты статического расчета**

Наименование	Тип	Минимальное значение	Максимальное значение
Эквивалентное напряжение по Мизесу	SVM [МПа]	0.000606	4803.127843

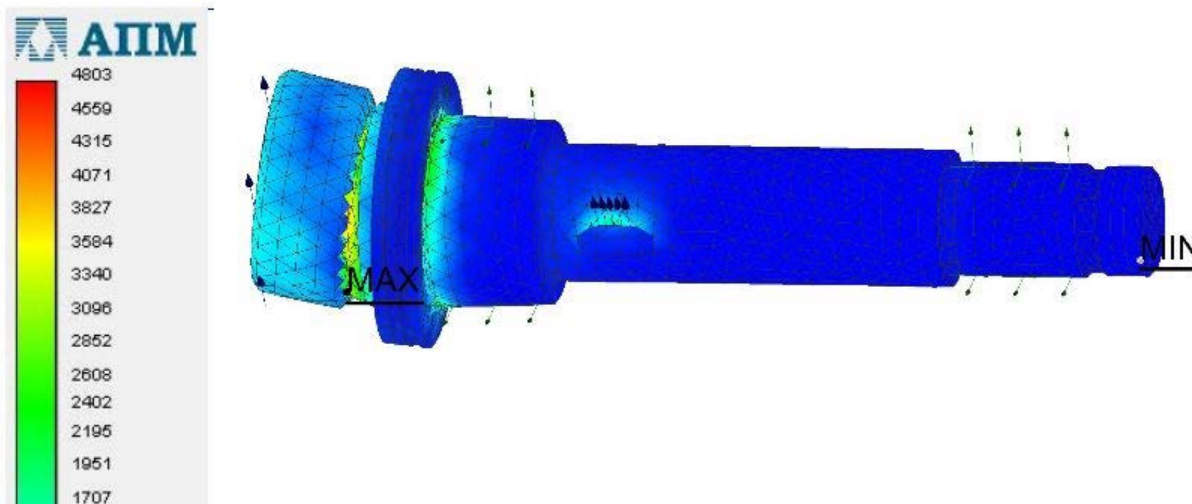


Рис. 6. Напряженное состояние шпинделя

Наименование	Тип	Минимальное значение	Максимальное значение
Суммарное линейное перемещение	USUM [мм]	0	1.160879

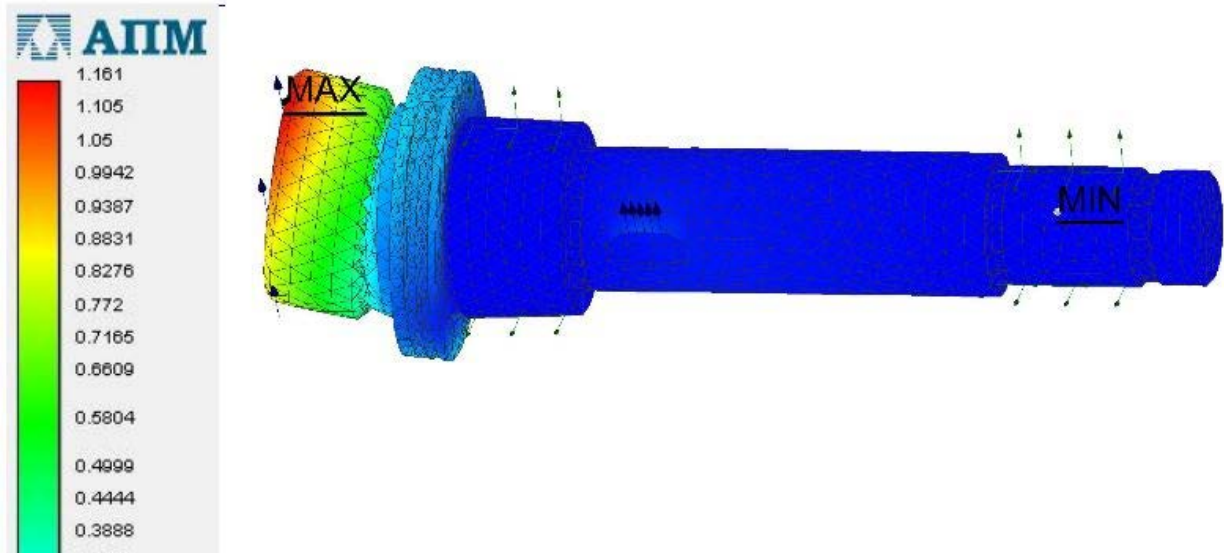


Рис. 7. Суммарные линейные перемещения

Наименование	Тип	Минимальное значение	Максимальное значение
Коэффициент запаса по текучести		0.049165	1000

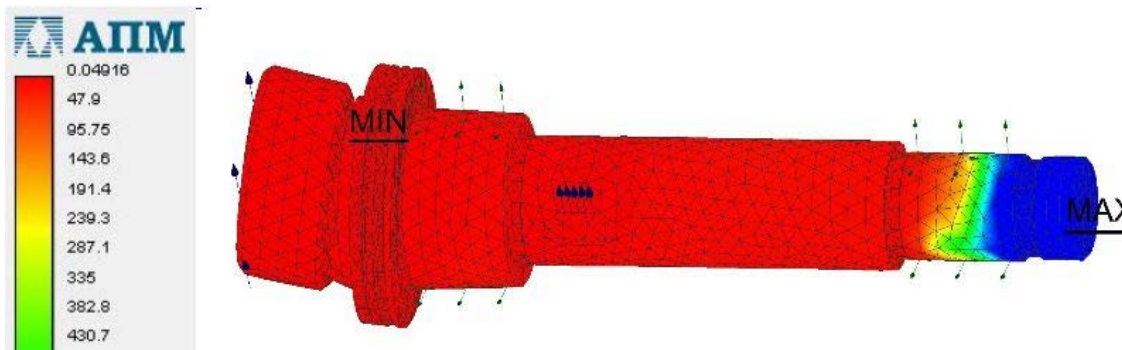


Рис. 8. Коэффициент запаса прочности

Нижче приведено протокол розрахунку в APM FEM

3) Інформація про навантаження

Наименование	Выбранные объекты	Параметры нагрузки
Удельная сила по длине: Удельная сила по длине:1	Ребра: 1	Вектор нагружения: X = 870; Y = 2516; Z = 0 Величина: 2662.171294 Н/мм
Удельная сила по длине: Удельная сила по длине:2	Ребра: 1	Вектор нагружения: X = 755; Y = 2265; Z = 0 Величина: 2387.519633 Н/мм

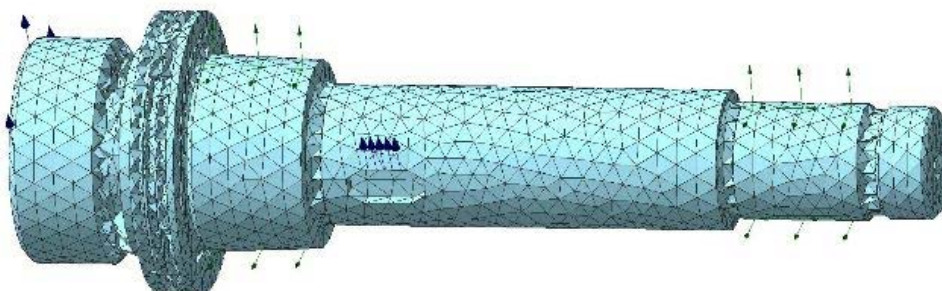
## 4) Информация о закреплениях

Наименование	Выбранные объекты	X [мм]	Y [мм]	Z [мм]	Rot. X [град]	Rot. Y [град]	Rot. Z [град]
Закрепление: Закрепление:1	Грани: 1	Запрещ.	Запрещ.	Запрещ.	-	-	-
Закрепление: Закрепление:2	Грани: 1	Запрещ.	Запрещ.	Запрещ.	-	-	-

## 5) Конечно-элементная сетка

## Параметры и результаты разбиения

Наименование	Значение
Максимальная длина стороны элемента [мм]	5
Максимальный коэффициент сгущения на поверхности	1
Коэффициент разрежения в объеме	1.5
Количество конечных элементов	25754
Количество узлов	5659



## 6) Результаты

## Инерционные характеристики модели

Наименование	Значение
Масса модели [кг]	1.149566
Центр тяжести модели [м]	(-0.000048 ; -0.000066 ; -0.083411)
Моменты инерции модели относительно центра масс [кг*м <sup>2</sup> ]	(0.000132 ; 0.000134 ; 0.011444)
Реактивный момент относительно центра масс [Н*м]	(27980.833096 ; -9328.013116 ; -345.056917)
Суммарная реакция опор [Н]	(-122356.461762 ; -366129.385286 ; 0)
Абсолютное значение реакции [Н]	386033.457753
Абсолютное значение момента [Н*м]	29496.74412

## Результаты статического расчета

Наименование	Тип	Минимальное значение	Максимальное значение
Эквивалентное напряжение по Мизесу	SVM [МПа]	0.000606	4803.127843

**Выводы.** 1. Проведено комплексное исследование конструкции специализированного вертикального фрезерно-сверлильного станка второго типоразмера модели СФ68ПФ3 с использованием геометрического моделирования в САПР КОМПАС и инженерного анализа проектируемого объекта с использованием модуля АРМ FEM.

2. Построена 3D модель станка и его формообразующих узлов в системе КОМПАС-3D, дающая реальное представление о конструкции и являющаяся основой для проектных расчетов и исследования работоспособности станка.

#### Литература

1. Ганин Н.В. Трехмерное проектирование в КОМПАС-3D [Текст] / Н. В. Ганин. – М.: ДМК, 2012. – 776 с.
2. Фомин Е.П. Использование параметрических возможностей КОМПАС-3D/САПР и графика, №10, 2007. – с.70-74.
3. Малюх В. Н Введение в современные САПР. Курс лекций / В. Н. Малюх. – М.: ДМК Пресс, 2012. –192 с.
4. Шелофаст В.В. Основы проектирования машин. Примеры решения задач / В.В. Шелофаст, Т.Б. Чугунова. – М.: Изд-во АПМ, 2004. – 240 с.
5. Замрий А.А. Практический учебный курс САД/САЕ АРМ WinMachine. Учебно-методическое пособие. – М.: Изд-во АПМ, 2007.– 144 с
6. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем: Справочник-учебник. В 3-х т. Т. 2. Ч. 1. Расчет и конструирование узлов и элементов станков / А. С. Проников, Е. И. Борисов, В. В. Бушуев и др. – М.: Машиностроение, 1995. – 371 с.
7. Мациевский А.Г., Эрлих Л.Б. Рационализация расчетов при конструировании станков. – М.: Машиностроение, 1971.- 152 с.
8. Проектування металорізальних верстатів у середовищі АРМ WinMachine: підручник/ О.С. Кроль, С.В.Шевченко, В.І.Соколов. – Луганськ, вид-во СНУ ім. В. Даля, 2011. – 386 с.
7. Macievskij A.G., Jerlih L.B. Racionalizacija raschetov pri konstruirovanii stankov. – М.: Mashinostroenie, 1971.- 152 s.
8. Proektuvannja metalorizal'nih verstativ u seredovishhi ARM WinMachine: pidruchnik/ O.S. Krol', S.V.Shevchenko, V.I.Sokolov. – Lugans'k, vid-vo SNU im. V. Dalja, 2011. – 386 s.

#### Кроль О.С., Хмельницький А.В. 3D-моделирование шпиндельного узла кутовой головки багатооперационного верстата

*Наведено рішення задачі побудови тривимірних моделей шпиндельного вузла багатоопераційного верстата моделі СФ68ПФ4, з використанням модуля кінцево-елементного аналізу АРМ FEM, інтегрованого в САПР КОМПАС-3D. Розглянуто процедуру побудови 3D - моделі верстата і його формотворчих вузлів в системі КОМПАС-3D, що дає реальне уявлення про конструкції і є основою для проектних розрахунків та дослідження працездатності верстата. Отримано оцінки напружено-деформованого стану, що дозволяють намітити шляхи вдосконалення конструкції двухопрного шпиндельного вузла.*

**Ключові слова:** кутова головка, шпиндельний вузол, твердотільна модель, САПР КОМПАС, модуль АРМ FEM

#### Krol O.S., Khmel'nitsky A.V. 3D-modelling to spindle's node of angular head for multyoperation tool

*The solution of the problem of constructing three-dimensional models of the spindle assembly multioperational machine model SF68PF4 using module finite element analysis APM FEM, integrated CAD KOMPAS-3D. A comprehensive study of the structure of the vertical milling and drilling machine SF68PF4 the second size models using geometric modeling in CAD and engineering analysis KOMPAS designed object using the module APM FEM. The procedure of constructing 3D - model of the machine and its formative nodes in the system KOMPAS-3D, which gives a real idea of the design is the basis for design calculations and research performance of the machine. The estimation of the angle head performance machine equipped with a set of end mills with a diameter in the range of 3 ... 25 mm. The calculation of cutting conditions is given. Estimations of the stress-strain state, allowing to identify ways to improve the design of two-bearing spindle assembly.*

**Keywords:** angle head, spindle, solid model, CAD KOMPAS module APM FEM

**Кроль Олег Семенович** – кандидат технічних наук, професор кафедри машинобудування, верстатів та інструментів Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, [krolos@yandex.ru](mailto:krolos@yandex.ru)  
**Хмельницький Андрій Валерійович** – студент кафедри машинобудування, верстатів та інструментів Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля.

*Рецензент: Соколов В.І., д.т.н., професор*

Стаття подана 30.09.2015.

УДК 621.9.06

## ИССЛЕДОВАНИЕ ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА УГЛОВОЙ ГОЛОВКИ МНОГООПЕРАЦИОННОГО СТАНКА

Кроль О.С., Хмельницкий А.В.

## INVESTIGATING TO SPINLE'S NODE OF ANGULAR HEAD FOR MULTYOPERATION TOOL

Krol O.S., Khmelniisky A.V.

*Приведено решение задачи анализа работоспособности шпиндельного узла, используемого в многооперационном станке модели СФ68ПФ4. Получены оценки напряженно-деформированного состояния, позволяющие моделировать конструкцию двухопорного шпиндельного узла по критериям прочности и жесткости.*

**Ключевые слова:** угловая головка, шпиндельный узел, твердотельная модель, САПР КОМПАС, модуль АРМ FEM

**Введение.** В практике машиностроительного производства встречается целая гамма деталей, имеющих сложную геометрию с труднодоступными поверхностями. Традиционные компоновки станков сверлильно-фрезерно-расточного типа не могут обеспечить полный цикл обработки корпусных деталей такой конфигурации. Возникает необходимость повышения технологических возможностей металлорежущего оборудования с использованием специальной технологической оснастки. Особенно актуально эта проблема стоит перед разработчиками многоцелевых станков и обрабатывающих центров. Эффективность внедрения такого оборудования зависит также от используемого комплекта модульной оснастки. Часто сменяемые инструментальные блоки и выдвигаемые требования к повышению точности изготавливаемых изделий приводит к необходимости проведения исследований по критериям прочности и жесткости шпиндельных узлов.

В работе по исследованию жесткости формообразующих узлов рассматриваются конструкции обрабатывающих центров среднего типоразмера [1], предлагается процедура «зондирования» показателей податливости шпинделя с инструментом в рамках рабочей зоны обработки с учетом типоразмера станка. В работе [2] рассматривается процедура комплексного исследования упругой системы «патрон-деталь» в токарных прутковых автоматах [2]. Приводится модель, на основе которой оценивается

работоспособность конструкции оснастки токарных автоматов по критериям жесткости и виброустойчивости.

В работе [1] приводится численная оценка изменения жесткости с привязкой к координатам детали и координатам инструмента и оценивается ее связь с принятой компоновкой для данного типоразмера. Такая оценка получена для конкретного варианта оснастки главного привода и не отражает влияние типа оснастки на изменения базисной жесткости, что характерно для многооперационных станков.

На параметры жесткости станка значительное влияние оказывает компоненты системы «оснастка-инструмент» или «оснастка-деталь». Исследование такой упругой системы как «патрон-деталь» осуществляется на базе расчетной модели зажимного патрона в виде «балка с заделкой», рассматриваемая как упруго-фрикционный шарнир, позволяющий добиться большего приближения по точности в расчете деформационных характеристик станка. Вместе с тем, по сравнению с токарными прутковыми автоматами в многоцелевых станках значительно шире представлены типы применяемой оснастки, а следовательно и разнообразие технологических операций.

В связи с повсеместным распространением автоматизированного металлообрабатывающего оборудования, появляется необходимость решения задачи – определение и исследование характеристик жесткости для многооперационного станка при выполнении специфических технологических операций.

**Целью данной работы** является повышение эффективности процесса проектирования за счет построения твердотельных моделей шпиндельных узлов, использования системы комплексного инженерного анализа для определения упруго-деформационных характеристик шпинделей многооперационных станков, оснащенных модульной оснасткой.

**Изложение основного материала.** Для реализации технологического процесса обработки труднодоступных поверхностей корпусной детали используется угловая головка, которая зачастую входит в комплект поставки проектируемого оборудования, позволяет расширить технологические возможности сверлильно-фрезерно-расточных станков. Угловая головка предназначена для обработки в труднодоступных участках заготовок плоскостей, уступов и пазов. Она обеспечивает высокопроизводительную обработку при частотах вращения шпинделя до  $4000 \text{ мин}^{-1}$  с возможностью угла поворота шпинделя на  $360^\circ$  в горизонтальной плоскости. Кинематическая схема привода главного движения представлена на рис. 1.

Вращательное движение от вертикального шпинделя на шпиндель головки угловой передается через коническую пару  $\frac{42}{42}$ . Уравнение

кинематической цепи углового шпинделя представлено ниже:

$$n_{\text{шп.угл.гол.}} = n_{\text{эл.дв.}} \times L_{\text{р.л.}} \times L_{\text{к.с.}} \times L_{\text{ност.л.}} \times L_{\text{ност.п.}}$$

На рис. 2 представлен фрагмент кинематической схемы угловой головки.

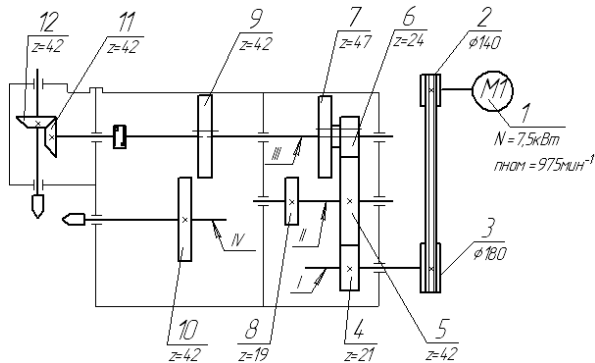


Рис. 1. Кинематическая схема привода главного движения

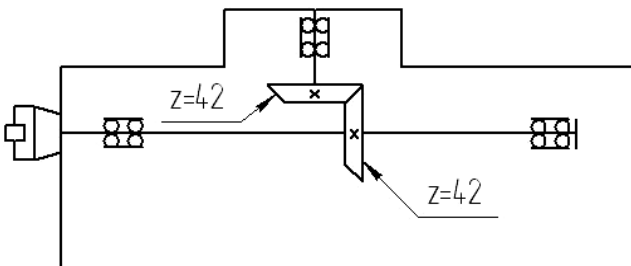


Рис. 2. Кинематическая схема угловой головки

Исследования жесткости шпиндельного узла (ШУ) осуществляется с помощью разработанной упругодеформационной модели [3] в виде аналитических зависимостей выходных характеристик ШУ от основных характеристик шпинделя (межопорное расстояние, диаметр под

переднюю опору) и опор (схема монтажа, тип подшипника, предварительный натяг).

Целесообразно выделить две основные компоненты:

- унифицированный шпиндельный узел, который может быть смонтирован в разнообразных многооперационных станках;

- инструментальный блок (инструмент) как изменяемый компонент, настраиваемый на различную номенклатуру изготавливаемых изделий и представленный в виде модульной инструментальной оснастки.

В различных сверлильно-фрезерно-расточных многооперационных станках применяются унифицированные шпиндельные узлы, которые оснащаются системами вспомогательных инструментов, в том числе с конусом Морзе и с конусностью 7:24 размерностью 30, 40, 45, 50 и 60 мм. В наборы оснастки входят оправки закрепляемой в шпинделе станка, переходные втулки и патроны для непосредственного крепления инструмента.

Среди характеристик ШУ, оказывающих наибольшее влияние на работоспособность его конструкции необходимо выделить длину межопорной части  $l$ , длину консольной части  $l_1$ , и диаметр  $d$ .

Первый компонент (унифицированный ШУ) представлен в упругодеформационной модели в виде статического формуляра  $sf$  [4], т.е. в виде аналитической зависимости перемещения опор  $\Delta_2$  и собственно шпинделя  $\Delta_3$  от длины консоли  $l_k$ .

Для того, чтобы разработать формуляр следует построить систему из четырех линейных уравнений с граничными условиями [3]. В качестве примера рассмотрим специализированный вертикальный фрезерно-сверлильный станок с ЧПУ модели СФ68ПФ4. В математической системе MAPLE разработана программа (рис. 3) и с ее помощью получены в символьной форме величины реакций и моментов на задней и передней опорах  $\{R_z, R_p, m_z, m_p\}$ :

$$R_z = -0,04 + 0,0029 l_k; R_p = 0,96 + 0,0029 l_k; m_z = -24,44 - 0,064 l_k; m_p = 91,18 + 0,74 l_k$$

Вычисленные значения реакций позволяют определить прогиб  $y(x)$  и угол поворота  $y'(x)$  на правом конце шпинделя ( $x=l+l_1$ ) в функции от длины  $l_k$  условной консоли:

$$y = y(l+l_1) = -0,000014 - 6,91 \cdot 10^{-8} \cdot l_k, \text{ мм};$$

$$y' = \theta(l+l_1) = -2,67 \cdot 10^{-8} - 6,17 \cdot 10^{-10} \cdot l_k, \text{ град.}$$

```

Text Math Drawing Plot Animation
C Maple Input Monospaced 12 B I U
> A:=matrix(4,4,[-1,1,0,0,1+11,-11,1,1,Az-1^3/(6*E*Ips),-Ap,-az*1-1^2/(2*E*Ips),0,1^2/(2*E*Ips),0,-az-1/(E*Ips),-apl];
table([[4,1)=0.2370370370e-6,(1,4)=0,(2,2)=-62,(3,1)=0.1150617285e-5,(2,1)=174,(1,1)=-1,(2,3)=1,(4,2)=0,(4,3)=-0.5632804233e-8,(2,4)=1,(1,3)=0,(1,2)=1,(3,3)=-0.3938370370e-6,(3,4)=0,(3,2)=-0.10e-4,(4,4)=-0.14e-8]) (1)
> B:=vector(4,[R1,R1*lk,0,0]);
table([[1)=1,(2)=lk,(3)=0,(4)=0]) (2)
> X:=linsolve(A,B);
table([[1)=-(0.4228688568e-1)*(0.2863297827e-2*(lk)),(2)=-(0.9577131143*(0.2863297827e-2*(lk))),(3)=-((24.44104099)-(0.6433731701e-1*(lk))),(4)=-((91.17717219*(0.7436479604*(lk))))]) (3)
> Rz:=X[1];
-0.04228688568 + 0.002863297827 lk (4)
> Rp:=X[2];
0.9577131143 + 0.002863297827 lk (5)
> Rz+Rp;
0.9154262286 + 0.005726595654 lk (6)
> mz:=X[3];
-24.44104099 - 0.06433731701 lk (7)
> mp:=X[4];
91.17717219 + 0.7436479604 lk (8)
> Rz*(1+11)-Rp*11+mz+mp;
0.9999999997 lk (9)
> sf:=(Az-((1+11)^2/(6*E*Ips))*(1+11+3*lk))*Rz-((11^2/(6*E*Ips))*(11+3*lk))*Rp+(az*(1+11+lk)+((1+11)/(2*E*Ips))*(1+11+2*lk))*mz+(11/(2*E*Ips))*(11+2*lk)*mp;
(-0.00002318231292 - 5.721088435 10^-7 lk) (-0.04228688568 + 0.002863297827 lk) - 2.421264802 10^-8 (62 + 3 lk) (0.9577131143 + 0.002863297827 lk) (10)
+ (8.157088435 10^-7 + 7.975963720 10^-9 lk) (-24.44104099 - 0.06433731701 lk) + 1.171579743 10^-9 (62 + 2 lk) (91.17717219 + 0.7436479604 lk)
> simplify(sf);
-0.00001377124690 - 9.581147375 10^-8 lk - 6.167684094 10^-10 lk^2 (11)
> y(1+11):=Az*Rz+az*mz*(1+11)+mz*(1+11)^2/(2*E*Ips)-Rz*(1+11)^3/(6*E*Ips)+mp*11^2/(2*E*Ips)-Rp*11^3/(6*E*Ips);

```

Рис. 3. Фрагмент программы определения статического формуляра

На основе разработанной программы в среде MAPLE [4] получен статический формуляр шпиндельного узла, как средство его исследования в условиях применения различной инструментальной оснастки:

$$Sf = -0,000014 - 9,58 \cdot 10^{-8} \cdot \ell_k - 6,17 \cdot 10^{-10} \cdot \ell_k^2.$$

На рис. 4 представлены графики изменения перемещений, углов поворота и собственно статический формуляр шпиндельного узла станка СФ68ПФ3, построенные на основе разработанной автором программы в среде MatLab [5].

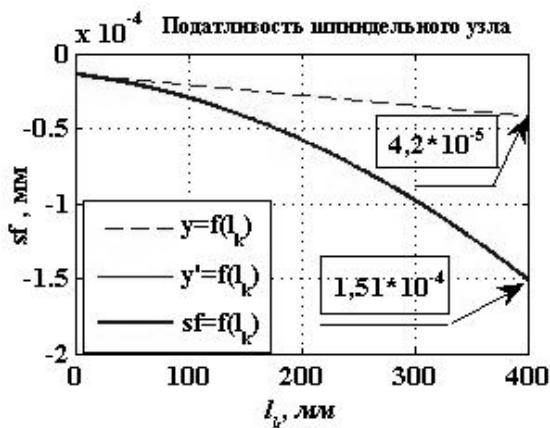


Рис. 4. Кривые податливости шпиндельного узла

Сравнение с допустимыми перемещениями и углами поворота сечений ШУ позволяет судить о работоспособности шпиндельного узла по критерию жесткости.

Аналогичные результаты получены в модуле проектирования валов и осей APM Shaft [6], который позволяет выполнить весь цикл проектирования валов, начиная от разработки конструкции и заканчивая статическим и динамическим расчетом. В специализированном графическом редакторе данного модуля в распоряжении конструктора предоставляются гибкие и удобные средства: задания конструкции вала; ввод нагрузок, действующих на вал; размещения опор, на которых установлен вал. Основным отличием графического редактора APM Shaft состоит в специализированном наборе графических примитивов, с которыми он оперирует. В качестве расчетного метода для определения деформированного состояния вала используется метод Мора, а раскрытие статической неопределенности выполняется методом сил.

Эпюры распределения сил и моментов и основные характеристики напряженно-деформированного состояния шпиндельного узла станка СФ68ПФ4, полученное в модуле APM Shaft представлено на рис. 5.

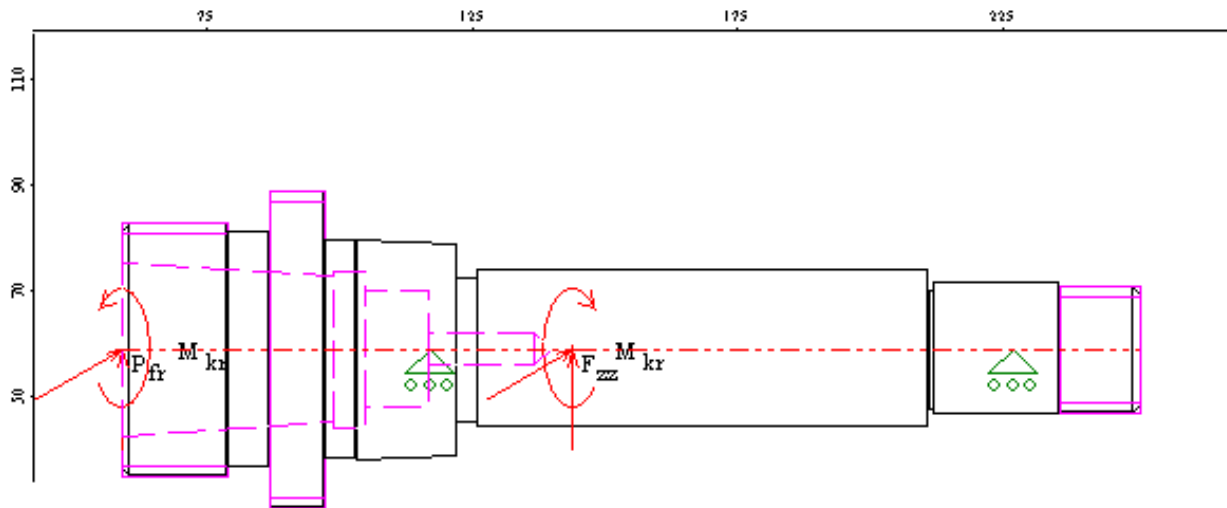


Рис. 5. Результаты расчетов шпинделя по критериям прочности и жесткости

Таблица: Нагрузки

**Радиальные силы**

N	Расстояние от левого конца вала, мм	Модуль, Н	Угол, град
0	0.00	1182.42	39.68
1	85.00	4200.11	75.54

**Моменты кручения**

N	Расстояние от левого конца вала, мм	Значение, Н·м
0	0.00	32.00
1	85.00	-32.00

**Реакции в опорах**

N	Расстояние от левого конца вала, мм	Реакция верт., Н	Реакция гориз., Н	Реакция осевая, Н	Модуль, Н	Угол, град
0	58.00	-2181.34	-4221.83	0.00	4752.06	-152.68
1	168.00	222.34	-600.17	0.00	640.03	159.67

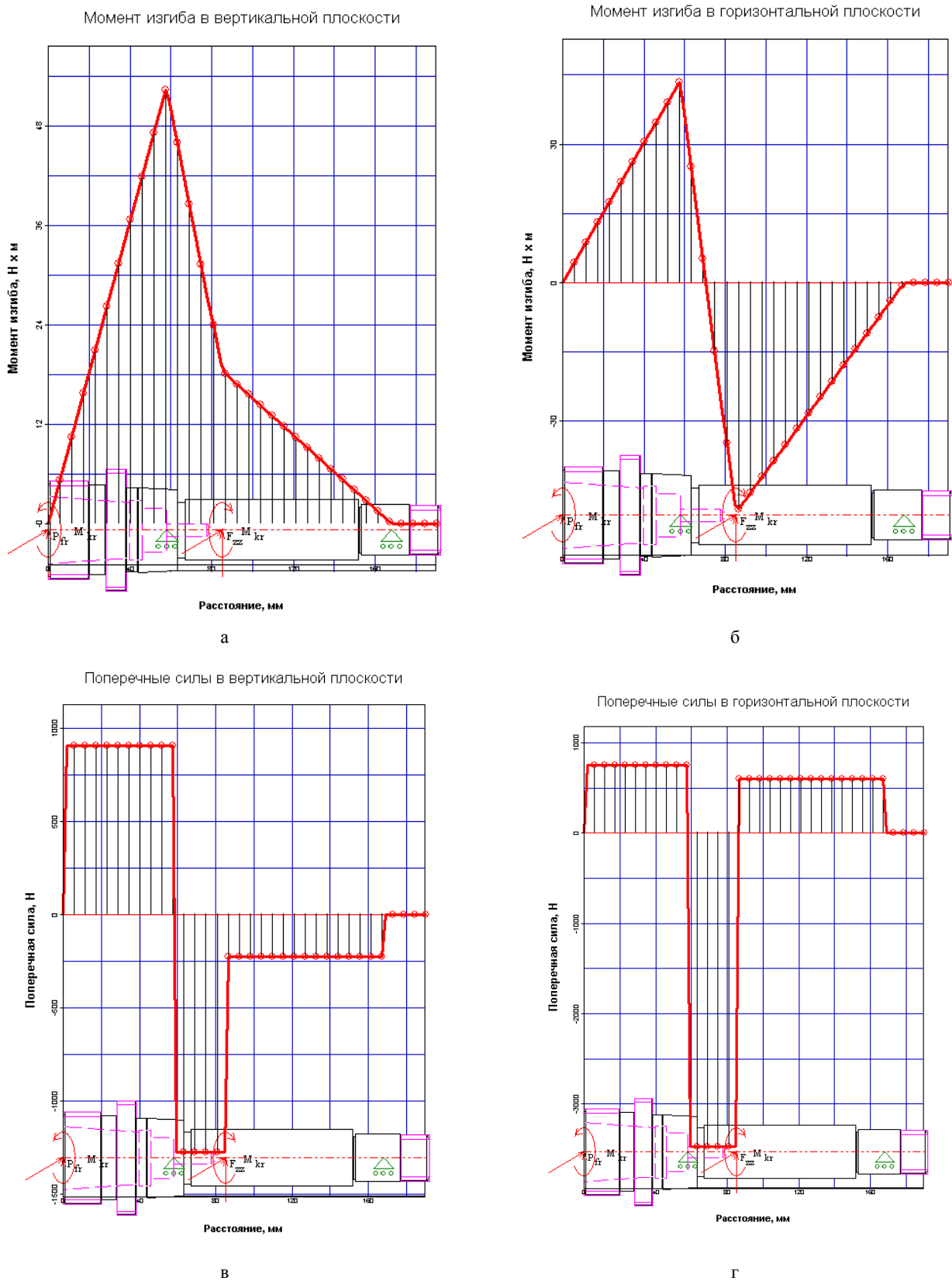


Рис. 6. Изгибающие моменты и силы, действующие на шпиндель

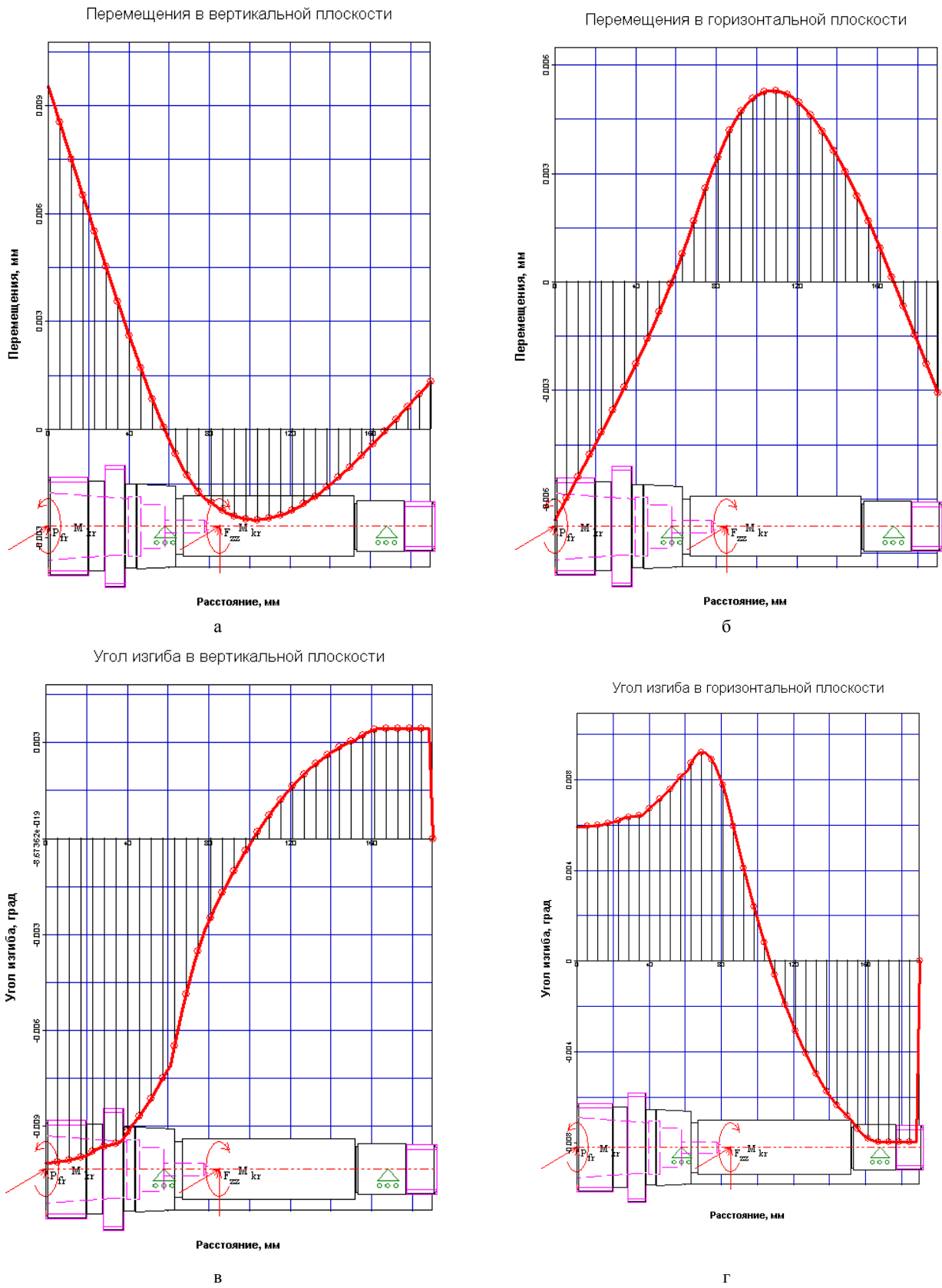


Рис. 7. Перемещения и углы изгиба сечений шпинделя

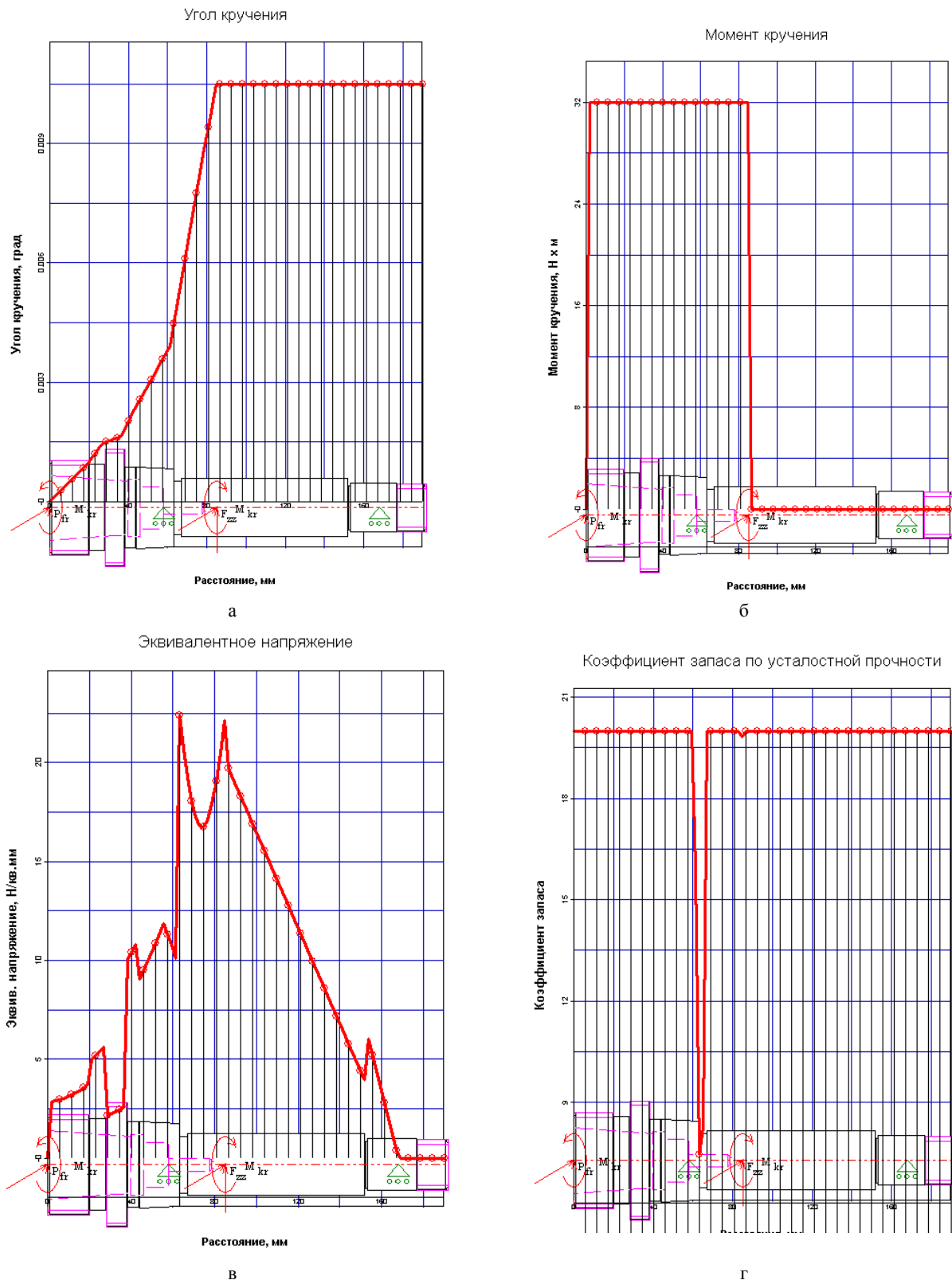


Рис. 8. Характеристики напряженного состояния шпинделя

**Выводы.** 1. Построена статическая модель унифицированного шпиндельного узла станка СФ68ПФЗ, учитывающая общие свойства двухопорных конструкций на радиально-упорных подшипниках качения. С помощью такой модели

рассчитываются статические формулы в символьном виде для станков представителей сверлильно-фрезерно-расточной группы. Это значительно сокращает трудоемкость расчетных работ и открывает перспективы масштабных

исследований в області моделювання і совершенствования современных конструкций шпиндельных узлов.

2. Выполнено комплексное исследование конструкции шпиндельного узла специализированного горизонтального фрезерно-сверлильного станка второго типоразмера модели СФ68ПФ3 с использованием модуля АРМ SHAFT и получены результаты расчета по критериям прочности и жесткости.

### Л и т е р а т у р а

1. Угринов П. Жесткость обрабатываемых центров среднего типоразмера / Угринов П. // Автоматизация и управление в машиностроении. - № 5. - 2001. - С.43-47.
2. Кузнецов Ю.Н. Новое в теории и практике проектирования зажимных механизмов / Кузнецов Ю.Н. // Вестник Киевского национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». «Машиностроение».- 1998.- выпуск 33.- С. 85-106.
3. Попов В.И. Динамика станков / Попов В.И., Локтев В.И. - Киев: "Техника".- 1975.-136 с.
4. Дьяконов В.П. Математическая система Maple / Дьяконов В.П. - М.: СОЛОН. - 1998. - 400 с.
5. Лазарев Ю. Моделирование процессов и систем в MATLAB. Учебный курс/ Лазарев Ю. - СПб: ПИТЕР. - 2005. - 512 с.
6. Шелофаст В.В. Основы проектирования машин. Примеры решения задач / Шелофаст В.В., Чугунова Т.Б. - М.: Изд-во АПМ. - 2004. - 240 с.
7. Ганин Н.Б. Трехмерное проектирование в КОМПАС-3D / Ганин Н.Б. - М.: ДМК. - 2012. - 774 с.
8. Krol O. Modeling of spindle for turret of the specialized tool type SF16MF3 / Krol O., Zhyravlev V. // ТЕКА Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. -Vol.13. - № 4.- Lublin, Poland. - P. 134 – 142.

### R e f e r e n c e s

1. Ugrinov P. Zhestkost' obrabatyvajushhiih centrov srednego tiporazmera / Ugrinov P. // Avtomatizacija i upravlenie v mashinostroenii. - № 5. - 2001. - S.43-47.
2. Kuznecov Ju.N. Novoe v teorii i praktike proektirovanie zazhimnyh mehanizmov / Kuznecov Ju.N. // Vestnik Kievskogo nacional'nogo tehničeskogo universiteta Ukrainy «Kievskij politehničeskij institut». «Mashinostroenie». - 1998.- vypusk 33. - P. 85-106.
3. Popov V.I. Dinamika stankov / Popov V.I., Loktev V.I. - Kiev: "Tehnika".- 1975.-136 s.
4. D'jakonov V.P. Matematičeskaja sistema Maple / D'jakonov V.P. - M.: SOLON. - 1998. - 400 s.
5. Lazarev Ju. Modelirovanie processov i sistem v MATLAB. Uchebnyj kurs/ Lazarev Ju. - SPb: PITER. - 2005. - 512 s.
6. Shelofast V.V. Osnovy proektirovanija mashin. Primery reshenija zadach / Shelofast V.V., Chugunova T.B. - M.: Izd-vo APM. - 2004. - 240 s.

7. Ganin N.B. Trehmernoje proektirovanie v KOMPAS-3D / Ganin N.B. - M.: DМК. - 2012. - 774 s.

8. Krol O. Modeling of spindle for turret of the specialized tool type SF16MF3 / Krol O., Zhyravlev V. // ТЕКА Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. -Vol.13. - № 4.- Lublin, Poland. - P. 134 – 142.

### Кроль О.С., Хмельницький А.В. Дослідження шпиндельного вузла кутової головки багатоопераційного верстата

Наведено рішення задачі аналізу працездатності шпиндельного вузла, використаного в багатоопераційному верстаті моделі СФ68ПФ4. Дано рекомендації з побудови статичних формулярів в символічному вигляді для двухопорного шпиндельного вузла на радіально-упорних підшипниках кочення. Розглянуто процедуру комплексного дослідження шпиндельної головки верстата на базі модуля проектування валів і осей АРМ SHAFT. Отримано оцінки напружено-деформованого стану, що дозволяють моделювати конструкцію двухопорного шпиндельного вузла за критеріями міцності і жорсткості.

Ключові слова: кутова головка, шпиндельний вузол, твердотільна модель, САПР КОМПАС, модуль АРМ FEM

### Krol O.S., Khmelniysky A.V. Investigating to spinle's node of angle-head for machining centre

The solution of problems to analysis of efficiency for spindle assembly used in multistage milling-boring SF68PF4 model type are describe. The analysis of the design angle head machine designed for processing in remote parts of pieces of planes, ledges and grooves is represented. A variant of the corner construction of the spindle head which provides high processing speeds with spindle to 4000 min<sup>-1</sup> with the possibility of rotation angle of the spindle 360° in a horizontal plane. Recommendations are given for the construction of static forms in symbolic form for the doubly-spindle unit in the angular contact ball bearings. It is proposed to allocate two components form a static associated with unified formative assembly and replacement tooling. A procedure for a comprehensive study of the spindle head of the machine based on module design shafts and axes ARM SHAFT. Estimations of the stress-strain state, allowing to simulate a double-seat structure spindle assembly according to the criteria of strength and stiffness.

Keywords: angle-head, spinle's node, solid model, CAD KOMPAS, module of APM FEM

Кроль Олег Семенович – кандидат технічних наук, професор кафедри машинобудування, верстатів та інструментів Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, [krol@yandex.ru](mailto:krol@yandex.ru)  
Хмельницький Андрій Валерійович – студент кафедри машинобудування, верстатів та інструментів Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля.

Рецензент: Соколов В.І., д.т.н., професор

Стаття подана 18.09.2015.

УДК 681.2-002.36.56  
543.42.062

## НАНОМЕТРИЧЕСКИЙ КОРПУСКУЛЯРНЫЙ ФОТОЭЛЕКТРОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР

Кулышев А.М., Черникова И.Д., Черников Н.Г.

## NANOMETRIC CORPUSKULAR PHOTOELECTRON SPECTRO-METER

Kulyshv A.M., Chernikova I.D., Chernikov N.G.

*Потребности техники и технологий привели к резкому ускорению опытно-конструкторских и научно-исследовательских работ для изучения в сверхвысоковакуумной среде как поверхностных так и объемных свойств твердых тел. В данной работе предлагается нанометрический сверхвысоковакуумный фотоэлектронный спектрометр, позволяющий производить комплексные исследования поверхностных и объемных свойств твердых тел в контролируемой среде. Наличие системы напуска газа, ионной и электронной пушки позволяют изменять структурное состояние поверхности исследуемого объекта, а наличие оже-спектрометра контролировать элементный состав на поверхности образцов. Корпускулярная спектрометрия позволяет определить энергетический спектр электронов, а также определить энергетические параметры исследуемой поверхности, что позволит полученную информацию широко использовать для создания полупроводниковых приборов в микро и наноэлектронике.*

**Ключевые слова:** диагностика, вакуум, фотоспектрометр, вакуумный манипулятор, вакуумный монохроматор, оже-спектрометр, дифрактометр.

Поверхность твердого тела привлекает все большее внимание специалистов различных областей науки и техники. За последние годы созданы оригинальные сверхвысоковакуумные многоцелевые аналитические приборы для контроля и диагностики разнообразных свойств поверхности твердых тел. Наука о поверхности также бурно развивается и, по мнению ученых, позволит получить много ценной информации о границе раздела различных фаз вещества [1].

Корпускулярная низкоэнергетическая диагностика поверхности основана на использовании заряженных частиц малых энергий и методов физической электроники и физики плазмы при исследовании физико-химических свойств поверхности твердого тела. При этом заряженные низкоэнергетические частицы могут применяться в качестве первичных или зондирующих поверхность

либо анализироваться как вторичные, возбужденные в твердом теле и покинувшие поверхность в результате воздействия первичных.

Диагностика (от греческого *diagnostikos* - способный распознать) - процесс познания. Диагностика поверхности твердого тела - общее название совокупности различных методов измерения физико-химических параметров и всестороннего изучения свойств поверхности - аналитической физической химии, электрофизики, оптики, физики полупроводников, радиационной физики и физической электроники, акустики и физики плазмы, молекулярной и ядерной физики и т.д.

Многообразие первичных частиц и квантов, воздействующих на поверхность, производящих различного рода возбуждения ансамбля частиц в приповерхностной области твердого тела и создающих множество вторичных частиц и квантов излучения, выходящих в вакуумную среду, обусловило создание целого класса эффективных методик анализа и контроля характеристик поверхности твердого тела [2, 3]. Для большинства методик корпускулярной диагностики свойств поверхности твердого тела характерно использование пучков первичных возбуждающих или зондирующих частиц различного массового, зарядового и энергетического состава, ускоренных до различных энергий и падающих на границу раздела твердого тела с вакуумом под различными углами. Покидающие поверхность вторичные частицы также имеют различные массовый, зарядовый и энергетический составы и характеризуются разными угловыми распределениями. Это позволяет изучать многообразные энергетические, угловые и зарядовые зависимости и массовый (элементный) состав поверхностной области твердого тела, используя обратно рассеянные, а также распыленные или эмитируемые частицы и кванты электромагнитного излучения.

По способу получения информации о поверхностях методы анализа делят на эмиссионные и зондирующие. Первые используют конкретный вид эмиссии тех или иных частиц с поверхности в результате различных воздействий: температуры, электрического поля, механических напряжений, трения, акустических волн, электромагнитных волн. Вторые основаны на эмиссии частиц или электромагнитного излучения в результате воздействия на поверхность зондирующего потока частиц: молекул, атомов, ионов, электронов, позитронов, квантов электромагнитного излучения.

Использование ионов, электронов, позитронов и квантов электромагнитного излучения малых энергий позволяет непосредственно изучать элементарные взаимодействия первичных частиц с частицами и квазичастицами поверхностной области твердого тела, а также с адсорбированными частицами, находящимися на поверхности в различных энергетически выгодных состояниях. Корпускулярная низкоэнергетическая диагностика позволяет изучать энергетическую электронную структуру приповерхностной области твердого тела, а также ее изменения, происходящие в результате очистки поверхности, адсорбции молекул простейших газов, радиационно-стимулированной десорбции и других воздействий.

Выбор экспериментальной техники и конкретного метода корпускулярной диагностики свойств поверхности твердых тел определяется задачами исследования, условиями, в которых производится диагностика, необходимым уровнем получаемой информации и ее многофакторностью.

Нанометрический сверхвысоковакуумный фотоэлектронный спектрометр для исследования поверхностных свойств твердых тел предназначен для изучения электронной и кристаллической структуры, а также для химического анализа приповерхностной области моно- и поликристаллов с возможностью целенаправленного воздействия на их поверхностные свойства с помощью ионной бомбардировки, высокотемпературного отжига, адсорбции различных газов и нанесения тонкопленочных покрытий.

Для получения наиболее выгодного вакуума необходимо, чтобы откачные системы удовлетворяли ряду требований:

а) возможность достижения расчетного предельного разрежения в откачиваемом объеме (это требование может быть выполнено лишь в том случае, если правильно подобраны вакуумные насосы и соблюдены правила вакуумной гигиены при сочленении элементов и узлов откачной системы);

б) возможность получения необходимой скорости откачки и максимальной добротности  $G$  вакуумной системы, оцениваемой отношением скорости откачки объема  $S_0$  к скорости действия насоса  $S_n$

в) удобство в работе и простота эксплуатации вакуумной системы, возможность ее максимальной автоматизации и оснащения средствами защиты.

Был произведен расчет вакуумной системы, выбор оборудования и определение конструктивных размеров соединительных трубопроводов и арматуры [4].

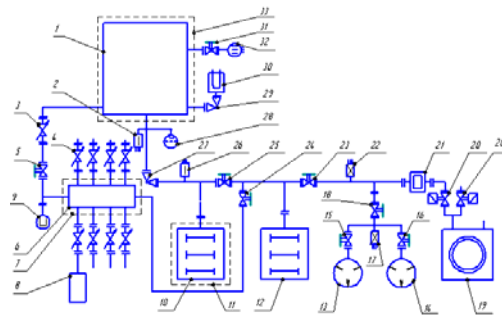


Рис. 1. Схема вакуумной системы нанометрического фотоэлектронного спектрометра:

- 1 – измерительная камера спектрометра;
- 2, 9, 17, 22, 26, 28 – аппаратура для измерения вакуума;
- 3 – игольчатый натекатель; 4 – дозирующие клапаны для напуска газа; 6 – камера напуска газа; 8 – система баллонов с газами; 5, 15, 16, 18, 23, 24, 25, 31 – вакуумные клапаны; 27, 29 – вакуумные угловые клапаны;
- 10, 12 – магнитоэлектрические насосы; 30 – сверхвысоковакуумный орбитронный насос;
- 13, 14 – цеолитовые вакуумные насосы; 19 – вращательный двухступенчатый вакуумный насос;
- 21 – прогреваемая адсорбционная ловушка;
- 19 – вращательный двухступенчатый насос;
- 20, 20<sub>1</sub> – клапаны с электромагнитным приводом;
- 33, 11 – печь для прогрева сверхвысоковакуумной части системы; 7 – печь для прогрева камеры для напуска газа;
- 32 – масс-спектрометр

Вакуумная система установки (рис. 1) изготовлена из стали 12X18H10T и состоит из аналитической камеры (1) и системы вакуумной откачки на базе безмасляных средств. Сверхвысоковакуумный орбитронный насос (30) СОН-А-1 (предельное остаточное давление при охлаждении жидким азотом  $10^{-13}$  мм.рт.ст. и быстрота откачки по воздуху в диапазоне давлений  $10^{-8} - 10^{-11}$  мм.рт.ст. 500 л/с), и насос (10) НМДО-0,25-1 (предельное остаточное давление  $5 \cdot 10^{-9}$  мм.рт.ст. и быстрота действия по воздуху при давлении  $5 \cdot 10^{-5}$  мм.рт.ст. 300 л/с) подключены к откачиваемому объекту через угловые (27, 29) клапаны КЭУТ-100. Игольчатый натекатель (3) предназначен для напуска воздуха или инертного газа в откачиваемую камеру при проведении определенных технологических операций. Измерительная аппаратура представляет собой набор манометрических преобразователей: (2) – электроразрядный преобразователь ММ-14М с измерительным блоком инверсно-магнетронного вакуумметра ВИМ-2А ( $10^{-4} - 10^{-13}$  мм.рт.ст.), (28) – сверхвысоковакуумный ионизационный манометр МИ-27 открытого типа с вакуумметром ВИ-14 ( $10^{-1}$

—  $10^{-10}$  мм.рт.ст.), (26) — магнитный электроразрядный преобразователь ММ-32-1 инверсно-магнетронного типа в комплекте с вакуумметром ВМБ-8 (предназначен для индикации давления в диапазоне  $10^{-2} - 10^{-9}$  мм.рт.ст.), имеет аналоговый выход на ЭВМ, высокую надежность и стабильность в работе; (9) — электроразрядный манометрический преобразователь ММ-13М-4А, действие которого основано на зависимости величины разрядного тока от давления газа с измерительным блоком вакуумметра ВМБ-3А ( $30 - 10^{-3}$  мм.рт.ст.), (17), (22) — термпарные преобразователи ПМТ-8 с блоком питания ионно-термопарного вакуумметра ВИТ-3 ( $10^{-1} - 10^{-3}$  мм.рт.ст.).

Магнитноразрядный насос (12) НОРД-100-1 (предельное остаточное давление  $5 \cdot 10^{-9}$  мм.рт.ст. и быстрота действия по воздуху при давлении  $5 \cdot 10^{-5}$  мм.рт.ст. 100 л/с) предназначен для предварительной откачки вакуумной камеры (1), магниторазрядного насоса НМДО-0,25-1 при открытых клапанах (25), (27) и закрытом клапане (24). Этот насос используется также для обезгаживания и очистки объекта (10) и сверхвысоковакуумной части системы (1) от загрязнений, используя для этой цели прогрев в печах (11) и (33). Насос НОРД-100-1 при закрытом клапане (25) и открытом клапане (24) применяется для откачки и обезгаживания при прогреве при помощи печи (7) камеры напуска газа (6).

Для предварительной откачки и получения низкого вакуума используются цеолитовые вакуумные насосы ЦВН-1-2 (13), (14) и механический вращательный насос 2НВР-5ДМ (19). В случае аварийного отключения питания применяются клапаны (20), (20<sub>1</sub>) с электромагнитным приводом, что позволяет предохранить систему от напуска атмосферного воздуха в систему.

Для многих вакууметрических исследований достаточно знать величину давления остаточного газа, не интересуясь его составом. Для этого можно использовать не требующие регулярной градуировки вакуумметры, измеряющие полное давление газа. Если же необходимо определять давление с той точностью, которую обеспечивает ионизационный или инверсно-магнетронный вакуумметры, то в этом случае нужно не только регулярно контролировать градуировку вакуумметра и знать относительные чувствительности прибора для различных газов, но также определять состав газов в системе.

При давлениях  $> 10^{-5}$  Па состав остаточного газа, вероятно, будет аналогичен составу атмосферного воздуха, находящегося в системе до откачки. При давлениях  $< 10^{-6}$  Па. Выделяющийся из деталей вакуумной системы газ становится основным в остаточном газе, вследствие чего остаточный газ может значительно отличаться по составу от атмосферного воздуха. Более того, во многих конкретных случаях знать состав

остаточного газа важнее, чем его давление (например, присутствие активных газов затрудняет изучение свойств поверхности твердых тел). Необходимо знать род хотя бы основной составляющей остаточного газа, а лучше — полный состав газа и давление его составляющих (так называемое парциальные давления). Поэтому, в нашем случае был выбран для измерения парциальных давлений монополярный масс-спектрометр МХ-7304 (32)

Система напуска газов (6) состоит из восьми баллонов (8) с очищенными газами: (инертными: гелий, неон, аргон, криптон, ксенон; активными: водород, кислород азот), системы трубопроводов с дозирующими вакуумными клапанами (4), камеры смешения газов и игольчатого натекателя (3). Система позволяет осуществлять напуск в аналитическую камеру чистых газов и их смесей в дозируемых пропорциях и в строго определенных количествах. Контроль газовой среды в аналитической камере производился с помощью масс-спектрометра МХ-7304 (32).

Аналитическая камера представляет собой цилиндр высотой 450 мм. и диаметром 300 мм. (рис. 2.).

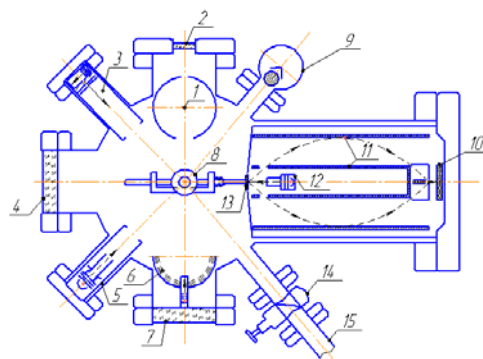


Рис. 2. Аналитическая камера нанометрического фотоэлектронного спектрометра:

1 – сферический фотоэлектронный спектрометр; 2 – окно MgF для ввода ультрафиолетового излучения; 3 – ионная пушка для очистки и травления образца; 4, 7 – смотровые окна; 5 – электронная пушка для очистки и отжига образца; 6 – полусферический четырехсеточный дифрактометр; 8 – прецизионный манипулятор с тремя степенями свободы; 9 – монополярный масс-спектрометр; 10 – фотоэлектронный умножитель; 11 – оже-анализатор (цилиндрическое зеркало); 12 – электронная пушка оже-анализатора; 13 – исследуемый образец; 14 – затвор шлюзовой камеры; 15 – вход в шлюзовую камеру

Вдоль оси камеры расположен трехстепенной прецизионный вакуумный манипулятор [5], позволяющий производить вращательное и радиальное перемещение образцов в экваториальной плоскости, а также их вращение вокруг своей оси. Образцы закреплены на держателях специальной конструкции, позволяющих производить передачу отработанного образца из манипулятора в кассету с образцами и

захват из этой же кассеты нового образца, что дает возможность исследовать четыре различных образца без вскрытия шлюзовой камеры (затвор 14 – вход в шлюзовую камеру) в одинаковых условиях.

Основными методами исследования образцов является фотоэлектронная спектроскопия в области вакуумного ультрафиолетового излучения, электронная оже-спектроскопия и дифракция медленных электронов.

Источником ультрафиолетового излучения служит высоковольтная водородная лампа с вакуумным монохроматором [6]. Излучение вводится в аналитическую камеру через окно из монокристалла фтористого магния (2) и падает на образец (13), помещенный в центр анализатора фотоэлектронов (1) типа квазисферического конденсатора Лукирского [7]. Интенсивность падающего на образец и отраженного излучения калибруется в абсолютных единицах, что позволяет измерять квантовый выход фотоэлектронов. Измерение фотоэлектронных спектров дает возможность исследовать валентные состояния электронов в приповерхностной области образца а также определить энергетические параметры исследуемой поверхности.

Электронный оже-спектрометр (11) создан на базе электронного энергоанализатора типа "цилиндрическое зеркало" [8]. Источником возбуждения служит стандартная электронная пушка (12) типа ЭЛОИИ. Химический анализ поверхности образца производится с помощью измерения интенсивности оже-линий различных элементов в спектре вторичных электронов и обеспечивает обнаружение микропримеси в количестве, соответствующем 0,01 моноатомного слоя и более. Регистрация с помощью данного анализатора спектров характеристических потерь энергии электронов позволяет исследовать плазменные возбуждения электронов в кристаллах, а также ионизационные электронные возбуждения.

Дифрактометр медленных электронов (6) создан на базе четырехсеточного квазисферического анализатора со стеклянным коллектором и позволяет (как анализатор с задерживающим полем) разделять электроны по энергиям, пропуская на коллектор часть электронов, обладающих энергией, большей величины, определяемой значением потенциала задерживающего поля. Так как анализаторы данного типа используют потоки электронов, расходящихся в больших телесных углах, то эффективность и чувствительность метода определяется в основном его разрешающей способностью. Светосила же устройств, задаваемая геометрией образующих электродов, обычно имеет максимальное значение. В данных анализаторах необходимо применять моноэнергетические пучки зондирующих электронов. Дифрактомер кроме того, что сказано выше, еще является незаменимым методом диагностики структуры поверхности твердых тел.

Подача образцов в аналитическую камеру осуществляется через шлюзовую камеру (9). (рис. 3). Конструкция камер загрузки и разгрузки изделий (образцов, приборов) стандартна – они имеют шлюзовые крышки (фланцы), соединяющие шлюз с атмосферой. Герметизация фланца (7) осуществляется вручную при помощи медной уплотняющей прокладки (8). Образец при загрузке помещается в специальную оправу (11), вместе с которой он перемещается в аналитическую камеру (смотри рис.2) через канал (15) и затвор шлюзовой камеры (14). Перемещения штока (6) вместе с оправой (11) осуществляется при помощи высоковакуумного ввода вращения, который присоединен к фланцу (1) камеры (3) и через коническую передачу (2) приводит во вращение гайку (4), перемещающую ходовой винт (5). Каретка (12) предохраняет шток (6) от провисания и способствует его перемещение вдоль оси шлюзового канала. Ходовой винт (5) через механизм параллелограмма (на рис. не показан) шарнирно связан с оправой (11) и позволяет при перемещении держателя образца вместе со штоком через затвор шлюзовой камеры (14) в аналитическую камеру состыковать держатель образца при помощи специального гнезда с осью манипулятора.

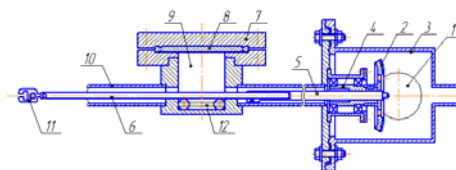


Рис. 3. Шлюзовая камера:

1 – фланец для крепления высоковакуумного ввода вращения; 2 – коническая передача; 3 – корпус камеры системы передачи движения; 4 – гайка; 5 – ходовой винт; 6 – шток; 7 – фланец; 8 – медная прокладка; 9 – камера загрузки исследуемого образца с держателем; 10 – канал шлюзовой камеры для переноса образца в аналитическую камеру; 11 – оправка для захвата образца; 12 – каретка

Очистка исследуемых образцов производится стандартными методами с помощью ионной бомбардировки, для чего в камере установлена ионная пушка (3). Также отжиг поверхности можно было производить при помощи высокотемпературного прогрева методом электронной бомбардировки при помощи электронной пушки (5).

Для напыления на исследуемые образцы тонких пленок различных веществ служат вольфрамовые испарители. Скорость напыления и толщина пленок контролируется в процессе напыления по сдвигу резонансной частоты кварцевого резонатора, включенного в схему кварцевых весов, с точностью до сотых долей моноатомного слоя.

Автоматизированная система электропитания, управления, регистрации сигнала и обработки

данных реализована на базе персонального компьютера, оснащенного широким набором периферийных устройств.

Техническая характеристика спектрометра  
 Предельное остаточное давление, Па  $1 \cdot 10^{-9}$   
 Диапазон энергий квантов УФ-излучения, эВ 5,0 – 10,9  
 Степень монохроматизации УФ-излучения, эВ 0,1  
 Энергетическое разрешение анализатора фотоэлектронов, % 1  
 Диапазон измерения электронных оже-спектров, эВ 100 – 2000  
 Энергетическое разрешение оже-анализатора, % 0,2  
 Диапазон температур прогрева образцов, К 300 – 2500  
 Диапазон энергий ионов, эВ 0 –  $5 \cdot 10^3$

**Выводы** Рассмотренный выше нанотехнический сверхвысоковакуумный фотоэлектронный спектрометр для исследования поверхности твердых тел имеет ряд положительных характеристик:

а) оригинальный трехступенной манипулятор совместно с шлюзовой камерой позволяет проводить исследования различных образцов без вскрытия аналитической камеры;

б) возможностью напуска в камеру дозированного количества одного из восьми различных газов или их смесей в заданных пропорциях;

в) сочетание нескольких методов исследования в одной установке, что позволяет получать более полную информацию об исследуемых образцах.

#### Литература

1. Копецкий Ч. В. О развитии фундаментальных и прикладных исследований в области физико-химических и механических свойств поверхности. / Ч.В. Копецкий // Вестник АН СССР. — 1979. №9. — с. 3—17.
2. Черепин В.Т., Васильев М.А. Методы и приборы для анализа поверхности материалов. Справочник. / В.Т. Черепин, М.А. Васильев // Наукова думка. Киев. — 1982. — с. 400.
3. Кремков М.В. Корпускулярная низкоэнергетическая диагностика поверхности твердого тела. /М.В. Кремков // Академия наук Узбекской ССР. Институт электроники имени У. А. Арифов; Ташкент: изд-во «ФАН» Узбекской ССР, 1986.— с. 164.
4. Бова О.Р., Чернікова І.Д., Черніков М.Г. Розрахунок та аналіз вакуумних систем / О.Р.Бова, І.Д.Чернікова, М.Г.Черніков // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: Зб. наук. пр. Луганськ: вид-во СНУ ім. В. Даля, 2010. — с. 193-202.
5. Бова А.Р., Волошин М.А., Латыш О.Б. и др. Сверхвысоковакуумный манипулятор в фотоэлектронной спектроскопии / А. Р. Бова, М. А. Волошин, О. Б. Латыш, И. Д. Черникова, Н.Г.Черников // Вісник СНУ ім. В. Даля, сб. наук. праць. В 2-х

частях. Луганськ: вид-во СНУ ім. В. Даля, 2010, ч.2. №8 (150) — с. 134-142.

6. Адамчук В. К., Федосеенко С. И., Александров В. М. Сверхвысоковакуумная металлическая установка для фотоэлектрических измерений в области  $h\nu \leq 10,9$  эВ. / В. К Адамчук, С. И. Федосеенко, В. М. Александров // ПТЭ, 1977, №1. — с. 178 – 179.
7. Лукирский П. И. О фотоэффекте / П. И. Лукирский // Ленинград – Москва: РТИЛ, 1933. — с. 96.
8. Зашквара В. В., Ильин А. М., Редькин В. С. и др. Цилиндрическое зеркало для разностных методов спектроскопии пучков заряженных частиц. / В. В. Зашквара, А. М. Ильин, В. С. Редькин, В. Я. Колот, М. И. Корсунский // ЖТФ, 1976. т. 46. — с. 1759 – 1766.

#### References

1. Kopeckij Ch. V. O razvitii fundamental'nyh i prikladnyh issledovanij v oblasti fiziko-himicheskikh i mehanicheskikh svojstv poverhnosti. / Ch.V. Kopeckij // Vestnik AN SSSR. — 1979. №9. — s. 3—17.
2. Cherepin V.T., Vasil'ev M.A. Metody i pribory dlja analiza poverhnosti materialov. Spravochnik. / V.T. Cherepin, M.A. Vasil'ev // Naukova dumka. Kiev. — 1982. — s. 400.
3. Kremkov M.V. Korpuskuljarnaja nizkoenergeticheskaja diagnostika poverhnosti tverdogo tela. /M.V. Kremkov // Akademija nauk Uzbekskoj SSR. Institut jelektroniki imeni U. A. Arifov; Tashkent: izd-vo «FAN» Uzbekskoj SSR, 1986.— s. 164.
4. Bova O.R., Chernikova I.D., Chernikov M.G. Rozrazhuk ta analiz vakuumnih sistem / O.R.Bova, I.D.Chernikova, M.G.Chernikov // Resursozberigajuchi tehnologii virobnictva ta obrobki tiskom materialiv u mashinobuduvanni: Zb. nauk. pr. Lugans'k: vid-vo SNU im. V. Dalja, 2010. — s. 193-202.
5. Bova A.R., Voloshin M.A., Latysh O.B. i dr. Sverhvysokovakuumnyj manipuljator v fotojelektronnoj spektroskopii / A. R. Bova, M. A. Voloshin, O. B. Latysh, I. D. Chernikova, N.G.Chernikov // Visnik SNU im. V. Dalja, sb. nauk. prac'. V 2-h chastjah. Lugans'k: vid-vo SNU im. V. Dalja, 2010, ch.2. №8 (150) — s. 134-142.
6. Adamchuk V. K., Fedoseenko S. I., Aleksandrov V. M. Sverhvysokovakuumnaja metallicheskaja ustanovka dlja fotojelektricheskikh izmerenij v oblasti  $h\nu \leq 10,9$  jeV. / V. K Adamchuk, S. I. Fedoseenko, V. M. Aleksandrov // PTJe, 1977, №1. — s. 178 – 179.
7. Lukirskij P. I. O fotoeffekte / P. I. Lukirskij // Leningrad – Moskva: RTIL, 1933. — s. 96.
8. Zashkvara V. V., P'in A. M., Red'kin V. S. i dr. Cilindricheskoe zerkalo dlja raznostnyh metodov spektroskopii puchkov zarjazhennyh chastic. / V. V. Zashkvara, A. M. P'in, V. S. Red'kin, V. Ja. Kolot, M. I. Korsunskij // ZhTF, 1976. t. 46. — s. 1759 – 1766.

**Кулишев О. М., Чернікова І. Д., Черніков М. Г. Нанотехнічний корпускулярний фотоелектронний спектрометр.**

*Потреби техніки і технологій призвели до різкого прискорення дослідно-конструкторських і науково-дослідних робіт для вивчення в сверхвысоковакуумному середовищі як поверхневих так і об'ємних властивостей твердих тіл. У даній роботі пропонується нанотехнічний сверхвысоковакуумний фотоелектронний спектрометр, який дозволяє проводити комплексні дослідження поверхневих і об'ємних властивостей твердих тіл у контрольованому середовищі. Наявність системи напуску газу, іонної та електронної гармати дозволяють*

змінювати структурний стан поверхні досліджуваного об'єкта, а наявність оже-спектрометра контролювати елементний склад на поверхні зразків. Фотоелектронний спектрометр дозволяє визначити енергетичний спектр електронів, а також визначити енергетичні параметри досліджуваної поверхні, що дозволить отриману інформацію широко використовувати для створення напівпровідникових приладів у мікро-і нанотехнологіях.

**Ключові слова:** вакуум, фотоспектрометр, вакуумний маніпулятор, вакуумний монохроматор, оже-спектрометр, дифрактометр

**Kulyshv A.M., Chernikova I. D., Chernikov N. G. Nanometric corpuskular photoelectron spectro-meter.**

*Requirements of engineering and technology have led to a sharp acceleration of experimental design and research for the study of ultra-high vacuum environment, as well as surface and bulk properties of solid bodies. In this paper, there is a nanometer ultrahigh-vacuum photoelectron spectrometer, which allowing to perform complex research of surface and volume properties of solid bodies in the controlled environment. The presence of gas inlet, ion and electron gun can change the structural state of the surface of the object, and the presence of Auger spectrometer is able to monitor the elemental composition of the surface samples. Photoelectron spectrometer is able to determine electron's energy spectrum*

*and to determine the energy parameters of the test surface, that is allowing to widely use this information to create semiconducting devices in micro- and nanoelectronics*

**Key words:** vacuum, spectrophotometer, vacuum manipulator, vacuum monochromator, Auger spectrometer, diffractometer.

**Кулишев О.М.** — студент групи ММ-451м кафедри машинобудування, верстатів та інструментів Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, [kulsan230@mail.ru](mailto:kulsan230@mail.ru)

**Черникова І.Д.** — ст. викладач кафедри машинобудування, верстатів та інструментів Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, [chernikova\\_i\\_d@ukr.net](mailto:chernikova_i_d@ukr.net)

**Черников М.Г.** — к. фіз.-мат. наук, доцент, доцент кафедри машинобудування, верстатів та інструментів Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, [chernikov\\_n\\_g@ukr.net](mailto:chernikov_n_g@ukr.net)

*Рецензент:* **Соколов В.І.**, д.т.н., професор

Стаття подана 10.11.2015.

УДК 658.562.012

## ВЛИЯНИЕ ИСКАЖЕНИЯ ФОРМЫ ЭЛЕМЕНТОВ НА ПРОЦЕСС РАСПОЗНАВАНИЯ ПЕРФОРАЦИОННОГО МАРКЕРА

Логунов А.Н.

## INFLUENCE DISTORTED FORM ELEMENTS ON THE RECOGNITION PROCESS PERFORATIONS MARKING

Logunov A.N.

*Рассмотрен вопрос влияния искажения формы элементов перфорационного маркера на процесс распознавания отверстий на изображении. Показано, что использование корреляционных фильтров делает систему считывания маркировки устойчивой к изменениям формы отверстий при распознавании маркировки.*

**Ключевые слова:** перфорационный маркер, корреляция, распознавание, идентификация, достоверность.

Индивидуальная идентификация изделий на всех стадиях обработки считается одним из способов включения механизмов экономической заинтересованности, технологической ответственности и увеличения достоверности используемой в автоматизированной системе управления предприятием (АСУП) информации, что в конечном итоге дает значительное повышение продукции высшего сорта. Системы идентификации изделий являются неотъемлемым элементом системы управления качеством.

Наибольшее распространение для маркировки получили штрих-коды. В последнее время распространяется применение двумерных кодов, или 2-D кодов, плотность записи информации в которых значительно выше. Технология их применения отработана. Коды стандартизованы. Вместе с тем, встречаются случаи, когда применение штрих-кодов и двумерных матричных кодов невозможно или невыгодно, и лучшими являются маркеры, состоящие из определенным образом расположенных отверстий, так называемые перфорационные коды. Они актуальны для производств, использующих сырье биологического происхождения и механическую, термическую и химическую обработку изделий, во время которой может удаляться наружный слой материала вместе с маркировкой, а также значительно изменяться оптические характеристики поверхности изделий.

Наиболее жесткие условия имеют место при маркировке шкур в кожевенном производстве. В течение обработки шкуры в кожу необходимо, чтобы сохранился маркер на шкуре, и его можно

было считать перед началом любой технологической операции. Перфорация гарантирует, что знак кодирования не исчезнет даже при двоении (разделение шкуры на две половины по толщине), что код останется на шкуре после ее обработки.

В процессе механической и химической обработки кожи возможны явления затягивания и деформации отверстия, смещение центра отверстия в верхней плоскости кожи относительно нижней, непараллельность верхней и нижней поверхностей отверстия из-за изменения толщины кожи [1]. Как показано в работе [2] кожа испытывает неоднородное растяжение с относительным остаточным удлинением для различных типов и видов кожи  $\varepsilon = 0,15...0,5$ . Неоднородное растяжение приводит к искажению отверстий, которые принимают эллипсоподобную форму.

Величина геометрических изменений формы перфорационных отверстий маркера экспериментально определялись на этапе нанесения кода, после обработке на дубильной галерее (вет блу) и на готовой коже в работе [3]. В этой работе показано, что отношение максимального диаметра к минимальному диаметру этого же отверстия на разных этапах обработки может колебаться от 1 до 3, т. е. отверстия могут подвергаться существенным искажениям. Актуальным выглядит вопрос, как эти искажения скажутся на процессе распознавания отверстий на изображении маркировки.

Поскольку для обнаружения отверстий используются корреляционные фильтры [4], то необходимо исследовать зависимость корреляции эталона с изображением деформированного отверстия. Матрица значений яркости элементов деформированного изображения  $R_{i,j} = f(\rho_{i,j})$  рассчитана по выражению,

$$f(\rho) = -0.001635\rho^5 + 0.0669\rho^4 - 0.94034\rho^3 + 4.54984\rho^2 + 5.1248\rho + 81.11088$$

в котором  $\rho_{i,j} = \sqrt{a \cdot (i-w)^2 + b \cdot (j-w)^2}$ , где  $a, b$  –

коэффициенты искажения по осям  $x$  и  $y$ ;  $i = 0, 1, \dots, 2w$ ,  $j = 0, 1, \dots, 2w$ ,  $w = 10$ .

Степень деформации отверстий

$$K_d = \frac{D_1}{D_2} = \sqrt{\frac{a}{b}}$$

характеризуется коэффициентом

$D_1$  - наибольший размер отверстия в направлении растяжения;  $D_2$  - размер отверстия в перпендикулярном направлении. Получены изображения деформированных отверстий табл. 1.

Эти изображения позволяют вычислить коэффициент корреляции с рассмотренными ранее цифровыми фильтрами и оценить влияние деформации отверстий. Результаты представлены в виде графиков на рис. 1.

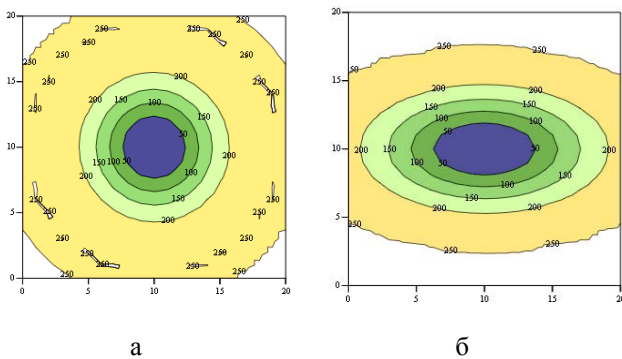


Рис. 1. Контурные графики яркости синтезированных изображений отверстия:  
а – эталонное изображение; б – изображение деформированного отверстия ( $K_d=1.953$ )

Приведенные на рис. 2 зависимости показывают, что корреляционные фильтры

нечувствительны к искажению формы отверстий. Так при деформации отверстия в два раза коэффициент корреляции комбинированного одномерного фильтра уменьшается менее чем на 5% (причем при самой неблагоприятной ориентации фильтра относительно оси деформации отверстия). Фильтр ядро-рамка в тех же условиях снижает отклик на 7.3%, а двумерный корреляционный фильтр – на 10%.

Для определения вероятности ошибочной классификации отверстий при искажении их формы использовались результаты распознавания тестового пакета изображений маркировки с использованием деформированных корреляционных фильтров. В частности, двумерный корреляционный фильтр был получен из изображений путем нормализации.

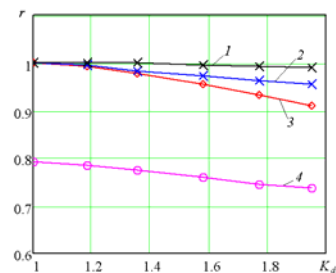


Рис. 2. Коэффициент корреляции  $r$  цифровых фильтров в зависимости от коэффициента деформации отверстия  $K_d$ :  
1 – одномерный корреляционный фильтр при благоприятной ориентации относительно оси деформации;  
2 – комбинированный корреляционный фильтр при неблагоприятной ориентации относительно оси деформации;  
3 – двумерный корреляционный фильтр;  
4 – фильтр ядро-рамка

Таблица 1

Результаты синтеза изображений деформированных отверстий

$K_d$	$a$	$b$	Изображение	$K_d$	$a$	$b$	Изображение
1	1	1		1.581	1.25	0.5	
1.183	1.05	0.75		1.772	1.35	0.43	
1.354	1.1	0.6		1.953	1.45	0.38	

Деформация фильтра ядро-рамка сводилась к изменению формы ядра в соответствии с формулой  $r_{i,j}^* = \sqrt{a \cdot (i-w)^2 + b \cdot (j-w)^2}$ , где  $r_{i,j}^*$  – расстояние от центра фильтра до пикселей ядра;  $r_{ker}$  – максимальное расстояние от центра фильтра до пикселей ядра,  $r_{i,j}^* \leq r_{ker}$ ,  $i = 0, 1, \dots, 2w$ ,  $j = 0, 1, \dots, 2w$ ,  $w = 7$ .

Форма деформированного фильтра ядро-рамка показана в таблице 2.

Для деформации комбинированного корреляционного фильтра используем выражение:  $F_{ix} = f(\rho_{ix})$ ;  $F_{iy} = f(\rho_{iy})$ , где  $i = 0, 1, \dots, 2w$ ,  $w = 7$ ,  $\rho_{ix} = \sqrt{a(i-w)^2}$ ,  $\rho_{iy} = \sqrt{b(i-w)^2}$ .

После выполнения нормировки, с тем, чтобы среднее значение яркости фильтра равнялась нулю:

$$\sum_{i=0}^{2w} (F_{ix} - C_{fx}) = 0 \quad \sum_{i=0}^{2w} (F_{iy} - C_{fy}) = 0$$

и нахождения значение постоянных  $C_{FX}$  и  $C_{FY}$

$$C_{fx} = \frac{\sum_{i=0}^{2w} F_{ix}}{2w+1} \quad C_{fy} = \frac{\sum_{i=0}^{2w} F_{iy}}{2w+1}$$

Нормированные значения фильтра  $F^*$  получаются с помощью преобразования:

$$F_{ix}^* = \frac{F_{ix} - C_{fx}}{F_{wx} - C_{fx}}, \quad F_{iy}^* = \frac{F_{iy} - C_{fy}}{F_{wy} - C_{fy}}$$

Последнее выражение дает значения коэффициентов деформированного одномерного корреляционного фильтра, вид которых для разной степени деформации приведен в таблице 3.

Результаты распознавания тестового пакета изображений представлены на рисунках 3 и 4.

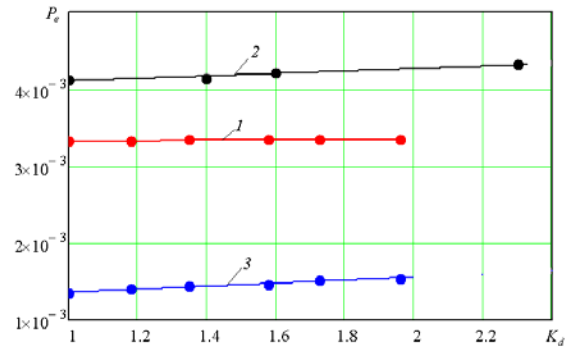


Рис. 3. Изменение вероятности ошибочной классификации в зависимости от степени деформации отверстия  $K_d$   
 1 –комбинированный корреляционный фильтр;  
 2 - фильтр ядро-рамка;  
 3 - двумерный корреляционный фильтр

Таблица 2

Деформированный фильтр ядро-рамка

$K_d$	a	b	Вид фильтра	$K_d$	a	b	Вид фильтра
1	1	1		1.581	1.25	0.5	
1.354	1.1	0.6		2.27	1.55	0.3	

Таблиця 3

Деформований комбінований кореляційний фільтр

К	a	b	График фильтра
1	1	1	
1.183	1.05	0.75	
1.354	1.1	0.6	
1.581	1.25	0.5	
1.772	1.35	0.43	
1.953	1.45	0.38	

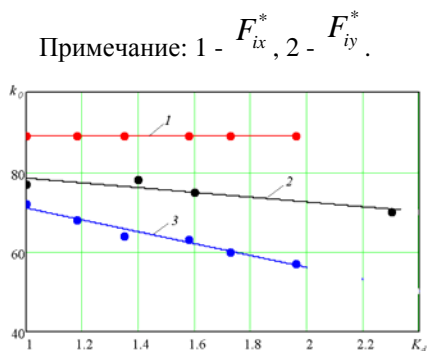


Рис. 4. Изменение оптимального порога классификации в зависимости от степени деформации отверстия К:  
1 – комбинированный корреляционный фильтр;  
2 – фильтр ядро-рамка;  
3 – двумерный корреляционный фильтр

Для рассматриваемых фильтров определялись вероятность ошибочной классификации и оптимальный порог классификации. Легко видеть, что наиболее устойчив к деформации комбинированный корреляционный фильтр – у него практически не меняются вероятность ошибочной классификации и оптимальный порог классификации вплоть до коэффициента деформации равного двум. Двумерный корреляционный фильтр показал небольшое увеличение (на 14%) вероятности ошибочной классификации при заметном изменении оптимального порога – на 26%. Близкие результаты продемонстрировал и фильтр ядро-рамка – 10% и 5%, соответственно.

Таким образом, можно сделать вывод, что корреляционные фильтры устойчивы к изменениям формы отверстий при распознавании маркировки.

#### Литература

1. Дубровкина М. В. Исследование влияния технологического процесса на характеристики перфорированного кода / М. В. Дубровкина // Адаптивные системы автоматического управления. Региональный межвузовский сборник научных трудов. - Вып. 10 (30). - Днепропетровск, 2007. - С. 32 – 44
2. Зурабян К. М. Материаловедение изделий из кожи: [учебник для ВУЗов] / Зурабян К. М., Краснов Б. Я., Бернштейн М. М. - М.: Легпромиздат, 1988. – 416 с.
3. Дубровкина М.В. Повышение достоверности распознавания кода при идентификации кожи в процессе её обработки: дис. ... кандидата техн. наук: 05.13.06 / Дубровкина Маргарита Васильевна.– Луганск, 2009. – 229 с.

4. Логунов А. Н. Распознавание перфорационного маркера в системе автоматизированной идентификации изделий / А. Н. Логунов, С. С. Ерошин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2007. – № 4/2 (28). – С. 60-65.

#### References

1. Dubrovkina M.V. Investigation of the effect of the process on the characteristics of the perforated code / M.V. Dubrovkina // Adaptive cruise control. Regional Interuniversity collection of scientific papers. - Vol. 10 (30). - Dnepropetrovsk, 2007. - S. 32 - 44
2. Zurabyan K. Material leather [textbook for high schools] / K.M. Zurabyan, Krasnov B.J. Bernstein M.M. - M.: Legpromizdat, 1988. - 416 p.
3. Dubrovkina M.V. Increasing the reliability of the recognition code for identification of the skin in the course of her treatment: dis. ... Candidate tehn. Sciences: 05.13.06 / Dubrovkina Margarita Vasilevna.- Lugansk, 2009. - 229 p.
4. Logunov A.N. Perforation detection marker in the automated identification of goods / A.N. Logunov, S.S. Eroshin // Eastern European Journal of advanced technologies. - 2007. - № 4/2 (28). - S. 60-65.

**Логунов О.М. Вплив спотворення форми елементів на процес розпізнавання перфораційного маркера.**

*Розглянуто питання впливу спотворення форми елементів перфораційного маркера на процес розпізнавання отворів на зображенні. Показано, що використання кореляційних фільтрів робить систему зчитування маркування стійкою до змін форми отворів при розпізнаванні маркування.*

**Ключові слова:** перфораційний маркер, кореляція, розпізнавання, ідентифікація, достовірність.

**Logunov A.N. Influence distorted form elements on the recognition process perforations marking.**

*The question of the influence of distortion of the marker elements perforation holes on the recognition process on the image. It is shown that the use of correlation filters makes the system read markings resistant to change in shape of the holes is detected markings.*

**Key words:** perforating marker, correlation, detection, identification, authenticity.

**Логунов О.М.** – к.т.н., доцент кафедри машинобудування, верстатів та інструментів Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля.

*Рецензент:* **Соколов В.І.**, д.т.н., професор.

Стаття подана 20.10.2015.

УДК 621.941

## СТОЙКОСТЬ ИНСТРУМЕНТОВ С КРУГОВОЙ РЕЖУЩЕЙ КРОМКОЙ

Мелконов Г.Л.

## THE RESISTANCE OF TOOLS WITH CIRCULAR CUTTING EDGE

Melkonov G.L.

*Рассмотрен процесс контроля за стойкостью чашечного резца в течении определенного времени работы. Предложены технологические показатели являющиеся критериями износа инструмента. Разработана методика проведения экспериментальных исследований. Представлены результаты проведенных стойкостных испытаний. По проведенным исследованиям сделаны выводы. С повышением стойкости инструмента и за счет этого появилась возможность повысить скорость резания. Повышение скорости резания благоприятно сказалось на производительности и стоимости операции. Построен график зависимости величины износа по задней поверхности от времени работы.*

**Ключевые слова:** стойкость чашечного резца, виды износа, время работы, технологические параметры.

### 1. Введение

Основанием для выбора установки режимов резания является требования предъявляемые к качеству обработанной поверхности, а также к стойкости любого режущего инструмента и чашечного в частности.

Стойкость режущего инструмента – это способность сохранять работоспособность режущего лезвия в течении определенного периода времени. Стойкость режущего инструмента существенным образом влияет на экономические показатели обработки – производительность и стоимость операции.

### 2. Анализ литературных данных и формулировка цели

Анализ литературных источников [1, 2] показал, что применение инструментов с круговой вращающейся кромкой ведет к значительному повышению периода стойкости и как следствие повышение производительности процесса обработки. В основе таких изменений лежит замена трение скольжение на трение качение между обрабатываемой заготовкой, стружкой и инструментом.

Результатами выполненных исследований, выше перечисленных авторов, явилось то что стойкость чашечного инструмента возросла в десятки и более раз.

Наряду с повышением стойкости инструмента и за счет этого появилась возможность повысить скорость резания. Повышение скорости резания благоприятно сказалось на производительности и стоимости операции. Производительность возросла, а цена операции снизилась. В основе повышения стойкости чашечного инструмента лежит увеличение длины режущего лезвия. Вращение инструмента способствует активному теплоотводу температуры поверхности инструмента.

Исследования проведенные в последнее время, указывают на то, что общепринятые степенные зависимости между стойкостью инструмента, режимами резания, геометрией режущего лезвия и другими параметрами в связи с расширением номенклатуры обрабатываемых материалов и развитием станочного парка оказываются непригодными. Поэтому появилась проблема установления новых отвечающих современным требованиям зависимостей.

Исходя из вышеизложенного можно сформулировать цель данной статьи – определение периода стойкости режущего лезвия чашечного резца от времени его работы – периода стойкости.

### 3. Методика проведения экспериментальных исследований

Методика проведения экспериментальных исследований, предусматривает обоснование выбранного направления экспериментальных исследований программу конкретных экспериментов, оценку точности и достоверности полученных данных, вывода эмпирической зависимости стойкости инструмента от времени работы. Учитывая вышеизложенное необходимо задаться следующими условиями режимы резания во время проведения эксперимента будут постоянными. Значение величин режимов резания выбирались из литературных источников [1 - 3, 4], а также в ходе проведения предварительных экспериментов. В этих экспериментах критерием выбора наиболее благоприятных режимов резания служили минимальные значения высоты шероховатости обработанной поверхности.

Результатом этой работы являются следующие режимы резания:  $V = 100 \text{ м/мм}$ ,  $S = 0,4 \text{ мм/об}$ ,  $t = 0,4 \text{ мм}$ . Одним из немаловажных параметров влияющих на процесс обработки является угол скрещивания осей обрабатываемой заготовки и инструмента  $\gamma = 37^\circ$ .

В качестве обрабатываемого изделия был принят карданный вал шахтного насоса. Карданный вал является нежесткой деталью ( $L > 10 d$ ) и одновременно выполняющий ответственную роль в конструкции насоса. Потому очень важно изготовить в соответствии с требованиями чертежа. Для изготовления карданного вала использовалась заготовка диаметром 45 мм длиной 410 мм из стали марки 40Х. Чертеж готовой детали карданный вал приведен на рисунке 1.

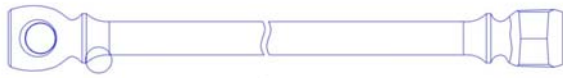


Рис. 1. Чертеж карданного вала

Заготовку карданного вала обрабатывали чашечным инструментом представляющим из себя твердосплавную пластинку марки Т15К10, с наружным диаметром режущего лезвия 32 мм толщиной 10 мм с углом наклона боковой (задней) поверхности. Этот инструмент использовался исключительно на чистовой операции (рис.2).

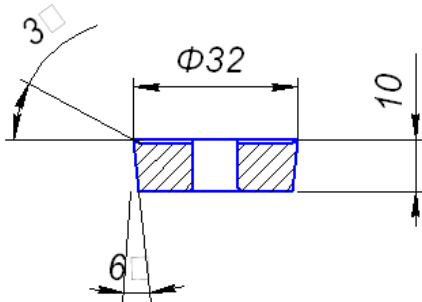


Рис. 2. Твердосплавная круглая пластинка

Стойкость чашечного инструмента контролировалась по двум параметрам: диаметру твердосплавной пластины по режущему лезвию и пояску износа по задней поверхности. Контролируемые параметры представлены на рис. 3.

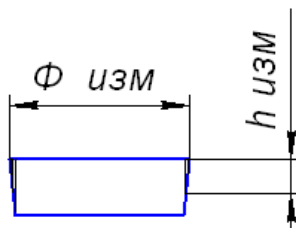


Рис. 3. Схема износа твердосплавной чашечной пластины

В качестве измерительного инструмента использовался штангенциркуль с часовым индикатором, с ценой деления 0,1 мм и инструментальный микроскоп БМИ-1 с точностью деления до 0,005 мм.

### 3. Результаты проведенных исследований

Заготовка карданного вала, предназначенного для чистовой обработки, устанавливалась на токарном станке модели 16К20. Один конец зажимался в патроне станка, второй конец поджимался центром задней бабки. Чашечный резец устанавливался в центрах токарного станка под углом  $\Gamma$  равным  $37^\circ$ . Режимы резания устанавливались в соответствии с приведенными в методике, равными  $V = 100 \text{ м/мин}$ ;  $S = 0,4 \text{ мм/об}$ ;  $t = 0,4 \text{ мм}$ . На чистовую операцию затрачено  $t = 126 \text{ мин}$ . Заготовке сообщалось вращение со скоростью  $100 \text{ м/мин}$ , в зону резания подводился чашечный резец и производилась чистовая обработка. После завершения чистовой операции деталь снималась со станка, а на её место устанавливалась новая заготовка. После каждой обработки детали производились замеры режущего лезвия чашечного резца на предмет определения износа, а результаты протоколировались табл. 1.

Замеры проводились диаметра режущего лезвия и ширины фаски по задней поверхности. Проводилось измерение и принимались средние значения.

Учитывая тот факт, что в данной работе ставилась цель определения времени в течении которого чашечный резец будет сохранять работоспособность, анализ таблицы показал, что наименьший износ чашки по диаметру и по задней поверхности будет в диапазоне времени  $T = 10 \text{ мин} \div 300 \text{ мин}$ . Свыше 300 мин наступает катастрофический износ. Критерием износа чашечного резца является качество обработанной поверхности – шероховатость, силы резания и температура резания.

Результатом проведенных экспериментов установлено, что достижение фаски износа по задней поверхности  $h_{\text{изн}} = 0,85 \text{ мм} \div 1 \text{ мм}$  отрицательно сказалось на высоте микронеровностей обработанной поверхности. Из анализа таблицы 1 и рисунка 4 видно, что шероховатость обработанной поверхности в начальный период течения вала составляла 1,6 мкм во временном отрезке от 20 мин до 200 обработки высота микронеровностей оставалась практически неизменной и составила  $R_a = 2 \text{ мкм}$ .

По результатам проведения исследований построен график зависимости величины износа по задней поверхности от времени работы.

Таблиця 1

**Результаты измерений износа чашечного резца по диаметру режущего лезвия  
и фаски износа по задней поверхности**

№ п/п	Время работы резца Т мин	Износ по диаметру $\varnothing_{\text{ИЗМ.}}$ , мм	Величина износа $D\varnothing = \varnothing - \varnothing_{\text{ИЗМ.}}$ , мм	Износ по задней поверхности и $h_{\text{ИЗМ.}}$ , мм	Шероховатость обр. поверхности $R_a$ и $R_z$ , мкм	Составляющая резания $P_y$ (Н)	Температура в зоне резания $Q^\circ$
1	10	$\varnothing 32$	-	-	$R_a = 1,6$	800	300
2	20	$\varnothing 31,97$	0,03	0,1	$R_a = 1,6$	800	300
3	40	$\varnothing 31,94$	0,06	0,2	$R_a = 1,6$	800	300
4	60	$\varnothing 31,9$	0,1	0,3	$R_a = 1,6$	800	310
5	80	$\varnothing 31,7$	0,3	0,37	$R_a = 1,6$	810	310
6	100	$\varnothing 31,58$	0,42	0,42	$R_a = 1,7$	810	320
7	120	$\varnothing 31,52$	0,48	0,5	$R_a = 1,79$	850	330
8	140	$\varnothing 31,47$	0,53	0,56	$R_a = 1,82$	870	370
9	160	$\varnothing 31,4$	0,6	0,61	$R_a = 1,88$	900	390
10	180	$\varnothing 31,3$	0,7	0,68	$R_a = 2$	930	415
11	200	$\varnothing 31,3$	0,7	0,71	$R_a = 2,5$	980	447
12	220	$\varnothing 31,25$	0,75	0,75	$R_a = 2,5$	1050	493
13	240	$\varnothing 31,1$	0,9	0,8	$R_z = 15$	1120	515
14	260	$\varnothing 31,1$	0,9	0,85	$R_z = 18$	1190	534
15	280	$\varnothing 31,1$	0,9	0,89	$R_z = 20$	1200	600
16	300	$\varnothing 31,1$	0,9	1	$R_z = 25$	1280	620
17	320	$\varnothing 31$	1	1,3	$R_z = 30$	1350	643
18	340	$\varnothing 29$	3	1,7	$R_z = 38$	1410	670
19	360	$\varnothing 28$	4	2	$R_z = 51$	1600	713

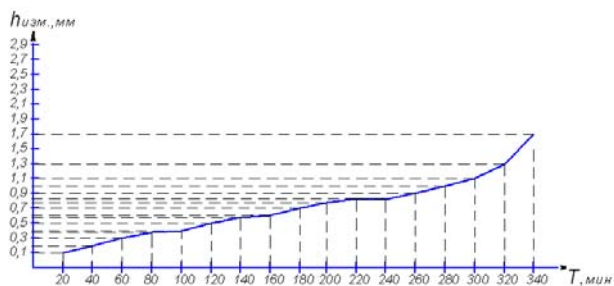


Рис. 4. График зависимости износа чашки  $h_{\text{ИЗН}}$  от времени работы Т

При дальнейшей обработке высота микронеровностей увеличивалась от  $R_a = 2$  мкм до  $R_a = 20$  мкм. После отработки чашечных резцов, по обработке карданных валов, 300 мин наступал катастрофический износ. Размер фаски по задней поверхности составил  $h_{\text{ИЗН}} = 1,7 - 2$  мм, что привело к катастрофическому износу. Высота микронеровностей достигла  $R_z = 51$  мкм. Аналогичная картинка наблюдалась и при исследовании зависимости силы резания и температуры от временного износа чашечного резца. Наиболее меньшие значения силы резания и температуры были при  $t = 220$  мин, потом

наблюдалось повышение до  $t = 320$  мин. С истечением времени работы более 300 мин эти показатели резко возрастали и достигли  $P_y = 1600$  Н,  $Q^\circ = 713^\circ$ . Это также свидетельствует о катастрофическом износе чашечного резца. В процессе проведения экспериментальных исследований зависимость изменения высоты шероховатости обработанной поверхности, силы резания и температуры от износа чашечного резца по диаметру не установлено. Анализируя проведенное экспериментальное исследование можно сделать предположение, что стойкость инструмента  $S$  от времени работы  $T$  будет представляться в общем виде:  $S = f(t)$ . Проведя анализ таблицы представленной на рис. 1 и графика построенного по данным таблицы можно сделать вывод, что кривая подчиняется следующему закону:

$$h_{\text{изм}} = \sqrt{T}, \quad (1)$$

то есть будет представлять из себя кривую приближенно напоминающую гиперболу.

#### Выводы

Основной целью проведенных экспериментальных исследований является установление зависимости стойкости чашечного инструмента от времени непрерывной эксплуатации.

Критерием износа чашечного резца являлось появление матовой ленточки по задней поверхности. С увеличением непрерывной работы чашечного резца ширина матовой ленточки увеличивалась.

За основу критериев износа чашечного резца принят технологический показатель – высота микронеровностей обработанной поверхности карданного вала. Также исследовалось влияние величины износа чашечного инструмента на такие параметры как сила резания и температура резания.

Установлено, что с течением времени от 0 мин до 220 мин величина износа по задней поверхности была минимальной и составила  $h_{\text{изм}} = 0,75$  мм,

высота микронеровностей равнялась  $R_a = 2,5$  мкм, сила резания колебалась в пределах  $P_y = 800 - 980$  Н, температура резания

$Q^\circ = 300 - 500^\circ$ . С дальнейшей эксплуатацией чашечного резца  $t = 300$  мин фаска износа достигла  $h_{\text{изм}} = 1$  мм; высота шероховатости  $R_z = 25$  мкм; сила резания  $P_y = 1280$  Н и температура в зоне

резания  $Q^\circ = 620^\circ$ . С дальнейшей эксплуатацией чашечного резца наступал катастрофический износ при  $t > 320$  мин и все экспериментальные

показатели достигли своего максимума  $R_a = 51$  мкм;  $P_y = 1600$  Н;  $Q^\circ = 713^\circ$ .

Дальнейшее проведение экспериментальных исследований являлось нецелесообразным т.к. это уже была бы зона чернового точения, а не чистового.

Выведенная эмпирическая зависимость (1) позволит определять величину износа по задней поверхности инструмента без проведения дополнительных экспериментальных исследований.

#### Литература

1. Валиев Р.З. Развитие равноканального углового прессования для получения ультрамелкозернистых металлов и сплавов // - Металлы. - 2004.- №1. - С. 15-21.
2. Рааб Г.И. К вопросу промышленного получения объемных ультрамелкозернистых материалов // - Физика и техника высоких давлений. - 2004. Т.15. № 1. - С. 72-80.
3. Бейгельзимер Я.Е. Винтовая экструзия – процесс накопления деформаций: підруч. [для студ. вищ. нач. закл.] / Я.Е.Бейгельзимер, В.Н.Варюхин, Д.В. Орлов, С.Г. Сынков. – Донецк: ТЕАН, 2003. – 87с.
4. Beygelzimer Y. A new severe plastic deformation method: Twist Extrusion / Y. Beygelzimer, D. Orlov, V. Varyukhin // - Ultrafine Grained Materials II: «Proceed. of TMS (The Minerals, Metals & Materials Society)». – 2002. – P. 297-304.
5. Varyukhin V.N. High pressure effects in severe plastic deformation / V. N. Varyukhin, Y.Y. Beygelzimer, B.M. Efros, O.V. Prokof'eva, V.P. Pilyugin // - Физика и техника высоких давлений. - 2004. – том 14. - №4. - С. 9-18.
6. Синков С.Г. Технологические схемы процессов накопления больших пластических деформаций // - Вестник двигателестроения – 2007, - №2, - С. 146-149.
7. Прокоф'ева О.В. Оценка величины давления металла на стенки матрицы при винтовой экструзии / О.В. Прокоф'ева, Я.С. Бейгельзимер // - ВІСНИК Домбаської державної машинобудівної академії -2005, - №1, - С.57-61.
8. Прокоф'ева О.В. Влияние профиля сечения матрицы на параметры винтовой экструзии / О.В. Прокоф'ева, Я.С. Бейгельзимер // - Физика и техника высоких давлений. - 2005. – том 15, - №4. - С. 65-71.
9. Пат. 64346 України, МПК В21С25/00 Матрица для зміцнення матеріалу при багаторазовому пресуванні /В.А. Тітов, М.С. Тривайло, Н.К. Злочевська, Е.В. Кондратюк, Г.І. Пейчев /заявл. 10.03.2011; опубл 10.11.2011, Бюл.21
10. Алексеев Ю.Н. Введению в теорию обработки металлов давлением прокаткой и резанием. - Харьков: ХГУ, 1969. - 108с

#### References

1. Valiev R.Z. Journal of Metallurgy, 2004. no 1. pp. 15-21.
2. Raab G.I. Journal of Fizika i tehnika vysokih davlenij, 2004. Vol.15. no 1. pp. 72-80.
3. Bejgel'zimer J.E., Varyukhin V.N., Orlov D.V., Synkov S.G. Vintovaja jekstruzija – process nakoplenija deformacij [Twist extrusion - process for deformation accumulation] Doneck, 2003. 87p.
4. Beygelzimer Y., Orlov D., V. Varyukhin V. Journal of Ultrafine Grained Materials II: Proceed. of TMS (The Minerals, Metals & Materials Society). 2002., pp. 297-304.

5. Varyukhin V. N. Beygelzimer Y.Y, Efros B.M., Prokof'eva O.V., Pilyugin V.P. Journal of Fizika i tehnika vysokih davlenij 2004. vol. 14. no 4. pp. 9-18.
6. Sinkov S.G. Journal of Vestnik dvigatelestroenija. 2007, no 2. pp. 146-149.
7. Prokof'eva O.V. Bejgel'zimer Y.Y HERALD of the Donbass State Engineering Academy. 2005. no 1, pp.57-61.
8. Prokof'eva O.V. Bejgel'zimer Y.Y Journal of Fizika i tehnika vysokih davlenij. 2005. vol. 15. no 4, pp. 65-71.
9. V.A. Titov, M.S. Trivajlo, N.K. Zlochevs'ka, E.V. Kondratjuk, G.I. Pejchev matricija dlja zmecnennja materialu pri bagatorazovomu presuvanni [A matrix is for strengthening of material at the frequent pressing] Patent Ukraïni no 64346 10.11.2011
10. Alekseev J.N. Vvedeniju v teoriju obrabotki metallov davleniem prokatkoj i rezanie. (To introduction to the theory of treatment of metals pressure rolling and cutting). Har'kov: HGU, 1969. 108 p.

**Мелконов Г. Л. Стійкість інструментів з круговою ріжучою кромкою**

У статті розглянут процес контролю за стійкістю чашкового різця протягом певного часу роботи. Запропоновані технологічні показники є критеріями зношення інструменту. Розроблена методика проведення експериментальних досліджень. Представлені результати проведених стійкісних випробувань. З проведених досліджень зроблені висновки. З підвищенням стійкості інструменту і за рахунок цього з'явилася можливість підвищити швидкість різання. Підвищення швидкості різання сприятливо позначилося на продуктивності та вартості операції. Побудований графік залежності величини зношування по задній поверхні від часу роботи.

**Ключові слова:** стійкість чашкового різця, види зносу, час роботи, технологічні параметри.

**Melkonov G. L. The resistance of tools with circular cutting edge**

The process of monitoring the resistance of the Cup cutter for a certain amount of time. The proposed process indicators are criteria of tool wear. The technique of experimental studies. Presents results of tests of. According to research findings. With increased tool life and because of this it has been possible to increase the cutting speed. The higher speeds have a positive impact on the performance and cost of operation. We plot the values of flank wear with time. Derived an empirical relation (1) will determine the amount of flank wear of the tool without the necessity of additional experimental studies. Further experimental research was inappropriate because it would already be area rough turning and not finishing. The methodology of experimental studies provides a rationale for the chosen directions of experimental research or specific experiments, evaluate the accuracy and reliability of received data, output the empirical dependence of tool life from time to time.

**Key words:** vitality bowl cutter, wear, work, technological options.

**Мелконов Григорій Леонидович** – к.т.н., доцент кафедри машинобудування, верстатів та інструментів Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, [G\\_melkonov@mail.ru](mailto:G_melkonov@mail.ru)

Рецензент: **Соколов В.І.**, д.т.н., професор

Стаття подана 23.11.2015.

UDC 621.048.6

## EXPERIMENTAL VALIDATION OF MATHEMATICAL MODEL FOR A 4-SPINDLE GRINDING-POLISHING MACHINE KINEMATICS

Melkonov G.L.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ЧЕТЫРЁХ ШПИДЕЛЬНОЙ ШЛИФОВАЛЬНОЙ МАШИНЫ ПОЛИРОВКИ КИНЕМАТИКИ

Мелконов Г.Л.

*Spindle device kinematic movement model is represented in the article. The expressions of kinematic indicators having major impact on rotation frequencies optimization have been given. The impact of rotation frequencies on numerical values of slip velocity has been outlined.*

**Key words:** spindle device, grinding-polishing machine, microroughness, sliding.

In order to prove the obtained mathematical model a preliminary experiment has been conducted. Cutting parameters for the preliminary experiments were chosen from literary sources. Spindle and workpiece rotation frequency is determined as  $N_{\min}=100-1400$  rpm, the whole device rotation frequency is  $N_n=50$  rpm.

The increase in rotation frequency of each of the 4 spindles of the device from 100 to 700 rpm at the starting moment leads to surface undulation magnitude sharp fall from  $Ra=1.5\text{mym}$  to  $Ra=0.55\text{mym}$ . Further spindle rotation frequency increase from  $n_{\min}=700$  rpm to 900 rpm leads to surface undulation minor decay (from  $Ra=0.55\text{mym}$  to  $Ra=0.5\text{mym}$ ).

It is explained by the fact that 4 spindles rotation frequency increase at the starting moment from 100 rpm to 600 rpm leads to surface undulation magnitude sharp fall at the expense of resultant sliding velocity rise. Within the range of rotation frequencies  $N_{\min}=600-900$  rpm slip velocity, between resultant sliding velocity array and chatter marks directions, tends to its optimum value, i.e. in this case the segment has minimum roughness altitude, i.e. these are ideal conditions for cutting. With the speedup  $N_{\min}=1300$  rpm we observe slight increase in slip velocity, sharp twofold rise in rolling rate and the same increase of angle between resultant slip velocity array and chatter marks. As a result, roughness altitude rises to  $Ra=0.8\text{mym}$ . For objective estimation of theoretical and empirical data variation we processed the results of test observations in

the existing method (1). Series of experiments consist of tentatives for each one.

We process the measurement results in the following order:

1. Determine medium value of rotation frequency from  $n$  measurements:

$$\bar{n} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n n_{sp} c_i$$

2. Find out inaccuracy of certain measurements:

$$\Delta n_{sp} = \bar{n}_{sp} - n_{sp}$$

3. Determine the root-sum-square uncertainty, measurement series result:

$$\Delta S n_{sp} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta n_{sp} i)^2}}{n(n-1)}$$

4. Estimate relative variation of empirical and theoretical data according to the formula:

$$\Delta = \frac{\bar{n}_{sp} - n_{sp}}{\bar{n}_{sp}} \cdot 100\%$$

Having processed the obtained results according to the described above methods we verify that variation of theoretical and empirical data does not exceed 2 %.

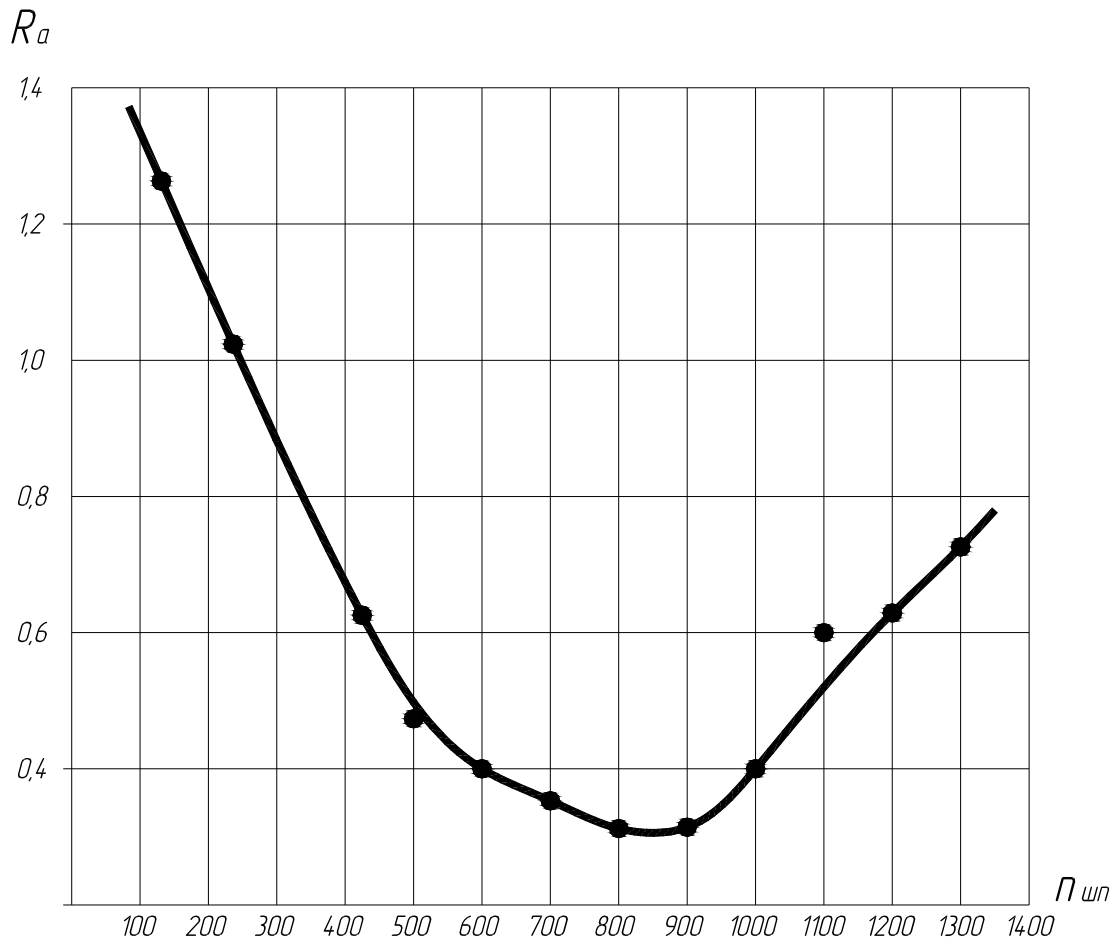


Fig. 1. Ra microroughness altitude –  $n_{sp}$  spindle rotation velocity relation

Therefore, the suggested theorizes for determining kinematical indicators are fully plausible for conducting further experimental research.

**The datum node of machine tools**

The metal-cutting machine tool is a machine, which is intended for processing of feedstock for formation a given surface by taking off a shaving or plastic deformation. Manufacturing equipment, which use electrophysical and electrochemical methods, focused electronic and laser ray, superficial plastic deformation and some other types for processing, is applied to the tools.

The metal-cutting machine tool is subdivided on some the most important parts, usually named as knots.

The main assembly of the machine tool informs movement to the tool or to the feedstock for realization the process of cutting with a corresponding speed. At the overwhelming majority of machine tools main assembly (Fig. 1 ) informs a rotary motion to a spindle, in which cutting tool or feedstock is fixed.

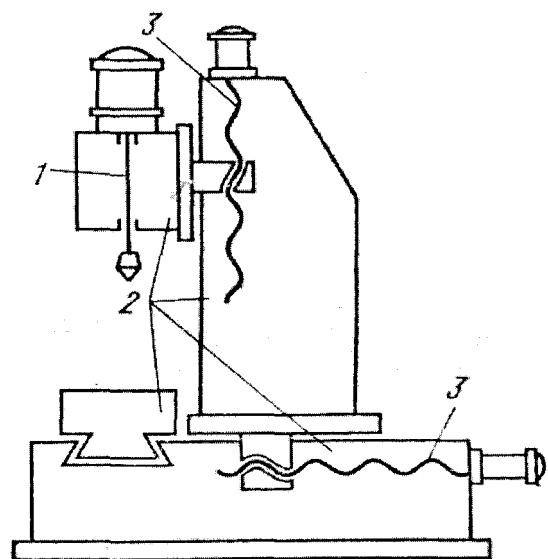


Fig. 2. Datum Node (assembly units) of the machine tool: 1 – main assembly, 2- basic parts, 3 – feeding device

### Resume

1. As a result of conducted mathematical investigation a mathematical model of spindle machine kinematical movement has been determined.
2. The expressions of kinematical indicators, having major impact on rotation frequency optimization have been led out.
3. The impact of rotation frequency on numerical values of slip velocity has been determined. As the rotation frequency rises  $n_{sp}=100-700$  rpm slip velocity increases approximately two times. With further rotation frequency increase, slip velocity remains almost unchanged. The diameter change of works from minimum to maximum leads to slip velocity rise, that, in its turn, positively affects the surface quality and work-piece accuracy.
4. Rolling speed survey shows that it is minimal at minimum values of rotation frequencies. As the rolling speed rises they increase approximately 2-3 times. With the work-piece diameter increase rolling speed drops, that, in its turn, favourably affects the treatment process.
5. As a result of pilot experiment the smallest altitude of microroughnesses  $Ra=0.55$   $\mu\text{m}$  will be at spindle rotation frequency equal to  $n_{sp}=600-900$  rpm.

### References

1. Adler Y.P., Markov E. V., Granovskiy Y experiment at the search of optimum terms. 2.th publ., pererab. and dop. – M.: Science, 1976. – 279 p.
2. Anup'ev V. I. M.:, 1979...1982. T. of 1 - 728 p.; t. of 2 - 559 p.; t. 3 - 557 p.
3. Arshanskiy v.v., Lizogub V.A. and other Automated planning of metal-cutting machine-tools: Train aid. – M.: VEMI, 1986.– 79 p.
4. Bal'mont V.G., Gorelik I.G., Figatner A.M. Details and mechanisms of machine tools
5. Beyzel'man R.D., Cypkin B.V., Perel' L.Ya. Bearings of woobling. Reference book. – M.: Engineer, 1975. – 572 p.

### Мелконов Г.Л. Экспериментальне обґрунтування математичної моделі для чотирьох шпиндельної шліфувальної машини полірування кінематики

*У статті представлена модель кінематичного руху шпиндельної установки. Відображені вираження кінематичних показників, що надають основний вплив на оптимізацію частот обертання. Відображено вплив*

*частот обертання на чисельні значення швидкості ковзання. В результаті проведених математичних розробок визначена математична модель кінематичного руху шпиндельної установки. Виведені вирази кінематичних показників, що надають основний вплив на оптимізацію частоти обертання. Дослідження швидкості показує, що при мінімальних значеннях частот обертання вона мінімальна, із збільшенням швидкості збільшується приблизно в 2-3 рази.*

**Ключові слова:** шпиндельна установка, шліфувальні - полірувальна установка, мікронерівностей, ковзання

### Мелконов Г.Л. Экспериментальное обоснование математической модели для четырех шпиндельной шлифовальной машины полировки кинематики

*В статье представлена модель кинематического движения шпиндельной установки. Отображены выражения кинематических показателей, оказывающих основное влияние на оптимизацию частот вращения. Отображено влияние частот вращения на численные значения скорости скольжения. В результате проведенных математических разработок определена математическая модель кинематического движения шпиндельной установки. Выведены выражения кинематических показателей, оказывающих основное влияние на оптимизацию частоты вращения. Исследования скорости показывает, что при минимальных значениях частот вращения она минимальна, с увеличением скорости увеличивается примерно в 2-3 раза.*

**Ключевые слова:** шпиндельная установка, шлифо - полировальная установка, микронеровность, скольжение.

**Мелконов Григорий Леонидович** – к.т.н., доцент кафедри машинобудування, верстатів та інструментів Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, [G\\_melkonov@mail.ru](mailto:G_melkonov@mail.ru)

*Рецензент: Соколов В.І., д.т.н., професор*

Стаття подана 15.11.2015.

УДК 621.941

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗАНЬЯ ОТ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ И УГЛА СКРЕЩИВАНИЯ ПРИ ЧИСТОВОМ ТОЧЕНИИ ВАЛОВ ЧАШЕЧНЫМИ ПРИНУДИТЕЛЬНО ВРАЩАЮЩИМИСЯ РЕЗЦАМИ

Мелконов Л.Д.

## DETERMINATION OF THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE CUTTING ANGLE OF THE CUTTING, AND WHEN CROSSING FINISH TURNING OF SHAFTS ROTATING CUTTERS TO FORCE CUP

Melkonov L.D.

*Подобран наиболее приемлемый метод определения температуры в зоне резания. Это метод термопар. Установлена зависимость изменения температуры в зоне резания от режимов резания и угла скрещивания инструмента и заготовки. Приведенные протоколы зависимостей, по которым построены графики. Приведено оптимальное значение режимов резания и угла скрещивания.*

**Ключевые слова:** чашечный принудительно вращающийся резец; метод термопар; режимы резания; угол скрещивания; температура в зоне резания.

### 1. Введение

В процессе обработки рабочих поверхностей винтовых валковых калибров чашечными принудительно вращающимися резцами в зоне резания возникают значительные силы резания, а также трения по передней и задней поверхностям инструмента приводят к пластическому деформированию обработанной поверхности. Вследствие перечисленного выше в зоне резания возникает температура. Величина температуры оказывает существенное влияние на процесс обработки: стойкость инструмента; качество поверхностного слоя; геометрические параметры готовой детали.

Целью данной работы является определение величины возникающей температуры в зоне резания.

### 2. Основное содержание работы.

С нашей точки зрения наиболее приемлемым методом для исследования температуры в зоне резания является экспериментальные методы.

Основным объектом исследования будет температура возникающая в зоне резания и изменения ее величины, в зависимости от режимов обработки и угла между осями заготовки и инструмента (угла скрещивания).

Из всех существующих методов по определению температуры в зоне резания с нашей

точки зрения наиболее приемлемым является – метод естественно образующейся термопары.

Однако измерить температуру в зоне резания при точении заготовок принудительно вращающимся резцом довольно проблематично. Это обуславливается постоянным вращением инструмента и как следствие обновления в зоне резания режущей кромки. Иными словами процесс обработки разделен на два участка:

1 – непосредственно рабочая зона;

2 – ветвь инструмента с «холостым» пробегом.

Этим и обуславливается трудность замера температуры резания в зоне резания.

Однако выбранный нами метод измерения температуры наиболее точен, т.к. измерения идет через ЭДС, а она возникает непосредственно в зоне контакта.

Сущность данного метода заключается в следующем: в процессе резания в контактной зоне заготовка – инструмент происходит соприкосновение передней поверхности инструмента со стружкой, а задней поверхности обработанной поверхностью в результате чего естественным путем создаются термопары. Электродами для термопар является материал обрабатываемой заготовки и материал режущей кромки инструмента. Включая деталь и инструмент в замкнутую цепь, способствуем возникновению ЭДС, величина которой практически соответствует температуре в зоне резания.

Для преобразования показаний милливольтметра в градусы Цельсия термопара подвергается специальной тарировке.

Схема измерения температуры при точении методом естественно образующейся термопары изображена на рис. 1. Обрабатываемая болванка 1 изолирована от патрона 3 и центра задней бабки эбонитовыми прокладками 5. Чашечный резец 2 из быстрорежущей стали или твердого сплава

изолирован от резцедержателя эбонитовой втулкой 5. Резец делают цельным для того, чтобы в месте приваривания или припаивания режущей пластинки к корпусу резца не образовались паразитные термопары. Болванка медным проводником соединена с гибким валом 6, закрепленным в эбонитовой втулке, установленной на конце шпинделя станка 4. Контактный наконечник 7 гибкого вала опущен в ванночку со ртутью 8. Милливольтметр 9 одной клеммой соединен с торцом резка, а вторым — с ртутным токосъемником. Замкнутая электрическая цепь состоит из болванки – проводника – гибкого вала — токосъемника – милливольтметра – резка – болванки. Болванку изолируют от станка для устранения влияния паразитных термопар, могущих возникнуть между отдельными деталями станка. Однако роль паразитных термопар при высокой температуре контактных поверхностей инструмента незначительна, и за счет некоторого снижения точности измерения установку можно упростить, отказавшись от изоляции болванки, сохранив изоляцию только инструмента.

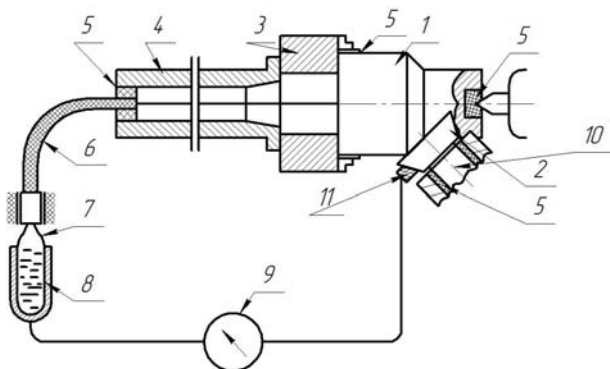


Рис. 1 Схема измерения температуры резания естественно образующейся термопарой

Изоляция чашечного принудительно вращающегося инструмента несколько затруднена, вследствие необходимости изолировать от станка не всю установку, а именно чашечный резец. Это обусловлено тем, что в приводном механизме чашечного резца много сопрягаемых поверхностей, в точках контакта которых возникают различные термоэлектродвижущие силы. Причем эти силы различны и постоянно изменяющиеся. Поэтому изолируют всю приводную систему резца от станка, а чашечный резец изолируют от привода на его шпинделе 10. ЭДС чашечного резца снимают с помощью подвижного контакта. В качестве подвижного контакта использовался медно-графитовый материал 11.

Проведенными лабораторными исследованиями установлено, что температура резания в значительной степени зависит от режимов резания и угла скрещивания осей обрабатываемой заготовки и чашечного инструмента. В результате проведенных лабораторных исследований получены экспериментальные данные. Результаты полученных экспериментальных занесены в таблицы 1-4. По этим данным построим кривые зависимости температуры в зоне резания от режимов резания и угла скрещивания осей заготовки и инструмента.

Анализ графиков (рис.2) показывает, что температура резания уменьшается при увеличении угла скрещивания  $\gamma_c = 105^\circ \dots 130^\circ$ , а при увеличении  $\gamma_c$  до  $160^\circ$  остается примерно на одном уровне. С увеличением скорости резания

$V = 3,5 \dots 12 \text{ м/с}$  уменьшается пластическая деформация, а следовательно, и уменьшается температура, образующаяся в зоне резания.

С увеличением глубины резания  $t = 0,2 \dots 1,5 \text{ мм}$  увеличивается длина лезвия, что улучшает теплоотвод и снижает температуру резания.

Таблица 1

**Зависимость температуры резания от угла скрещивания при  $V = 8 \text{ м/с}$ ,  $S = 0,38 \text{ мм/об}$ ,  $t = 0,4 \text{ мм}$**

Угол скрещивания $\gamma_c$	Температура в град
105	460
110	440
115	400
120	380
125	370
130	340
135	320
140	300
145	290
150	260
155	250

Таблица 2

**Зависимость температуры резания от скорости резания при  $\gamma_c = 140^\circ$ ;  $S = 0,38 \text{ мм/об}$ ;  $t = 0,4 \text{ мм}$**

Скорость резания $V$	Температура в град
3,0	275
4,5	320
6	350
7,5	380
9	400
10,5	450
12	475

Таблиця 3

Таблиця 4

**Зависимость температуры резания от подачи при  $V = 8\text{м/с}$ ;  $\gamma_c = 140^\circ$ ;  $t = 0,4\text{ мм}$**

**Зависимость температуры резания от глубины резания при  $V = 8\text{м/с}$ ,  $S = 0,38\text{мм/об}$ ,  $\gamma_c = 140^\circ$**

Подача S	Температура в град.
0,2	260
0,4	27
0,5	290
0,6	320
0,7	340
0,9	340
1,2	360

Глубина резания t	Температура в град.
0,2	280
0,4	310
0,6	340
0,8	360
1	360
1,2	400
1,4	420

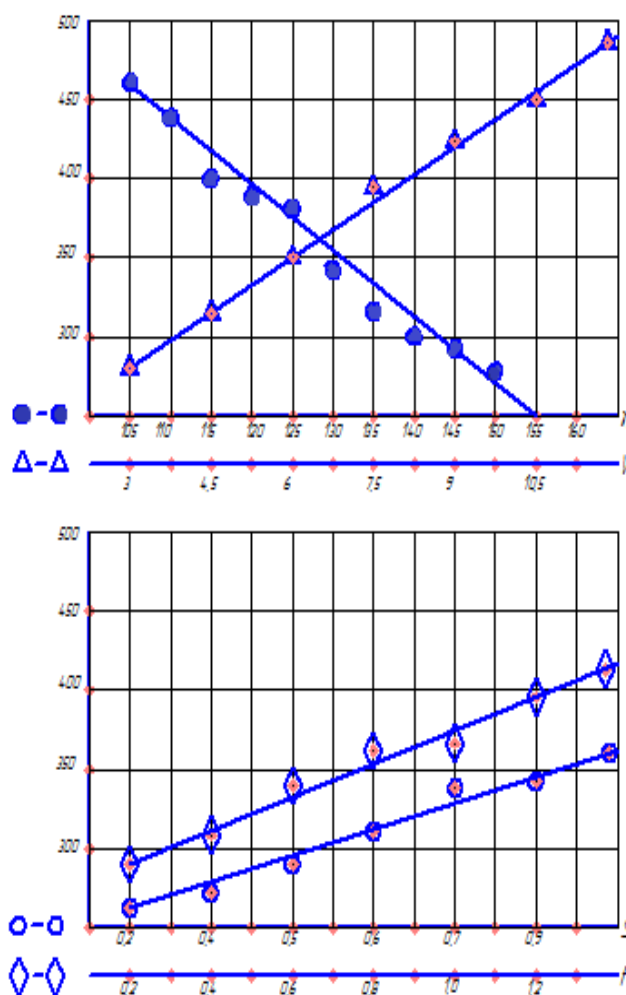


Рис.2. Зависимость температуры резания от угла скрещивания  $\gamma_c$ , скорости резания  $V$ , подачи  $S$  и глубины резания  $t$ .

При увеличении подачи  $S$  мм/об. возрастает давление стружки на инструмент и увеличивается площадь контакта стружки с передней поверхностью. Давление стружки способствует повышению температуры, а площадь контакта ее снижает. С увеличением подачи  $S$  0,2...1,4 мм/об. температура возрастает.

На основании экспериментальных данных, полученных при точении валов принудительно вращающимися чашечными резцами, по которым

построены графики, получена следующая эмпирическая зависимость температуры резания:

$$Q = C \cdot V^{0,20} \cdot S^{0,14} \cdot t^{0,2} \cdot \gamma^{-0,09} \quad (1)$$

где  $C$ - коэффициент, учитывающий влияние свойств обрабатываемого материала на температуру резания.

Проведенные экспериментальные исследования, построенные по ним графики (рис.2),

и выведенная формула (1) позволяют сделать следующие выводы и рекомендовать оптимальные режимы резания и угол скрещивания.

#### Выводы

1. При изменении угла скрещивания осей заготовки валкового калибра и принудительно вращающегося чашечного резца температура изменяется следующим образом: с увеличением угла скрещивания от  $\gamma_c = 105^\circ \dots 135^\circ$  происходит снижение температуры от  $500^\circ\text{C}$  до  $300^\circ\text{C}$ . Дальнейшее увеличение угла скрещивания  $\gamma_c$  на величину температуры оказывает незначительное влияние.

2. Увеличение скорости резания от  $V=3\text{ м/сек}$  до  $12\text{ м/сек}$  приводит к резкому увеличению температуры в зоне резания от  $250^\circ\text{C}$  до  $500^\circ\text{C}$ .

3. Анализ графиков зависимости температуры в зоне резания от увеличения подачи в пределах  $0,2-1,4\text{ мм/об}$ . И увеличение глубины резания температура в зоне резания плавно возрастает.

4. Отсюда можно сделать заключение, что наиболее оптимальная температура в зоне резания будет при угле скрещивания  $\gamma_c = 135^\circ-140^\circ$ ; скорости резания  $V = 4,5-6\text{ м/сек}$ ; подачи  $S = 0,6-0,7\text{ мм/об}$ ; и глубине резания  $t = 0,8-1\text{ мм}$ .

#### Литература

1. Гун А.С. Обработка прокатных валков [Текст] / Соколов В.Е., Огарков Н.Н. - М.: Металлургия, 1983. -112 с.
2. Северденко В.П. Валки для профильного проката [Текст] / Бахтинов Ю.Б., Бахтинов В.Б. - М.: Металлургия, 1979. - 224 с.
3. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов М.: Машиностроение, 1975.-345с.
4. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. -М: Машиностроение.1976.-200с.
5. Целиков А.И. Специальные прокатные станы [Текст] / Барбарич М.В., Васильчиков М.В., Грановский С.П., Жуневич-Стоша Е.А. - М.: Металлургия, 1971. -336 с
6. Мелконов Л.Д. Принудительное вращающийся чашечный резец - М.: Машиностроение, №3, 1980. с. 19
7. Мелконов Л.Д. Точение по методу обкатки – В кн. : «Автомобильная промышленность», №4, 1981, с. 29
8. Мелконов Л.Д. Технологическое обеспечение качества и точности обработки валов принудительно вращающимися резцами [Текст] / диссертация кандидата техн. наук /.-М: 1985г.-188с.
9. Ильющин А.А. Сопrotивление материалов. // Ильющин А.А., Ленски В.С. / М: Физматгиз, 1959. - 365 с.
10. Зорев Н.Н. Исследование элементов механики процесса резания// Зорев Н.Н. / М: Машгиз, 1952. - 363 с.

#### References

1. Gun A.S. Obrabotka prokatnyih valkov [Tekst] / Sokolov V.E., Ogarkov N.N. - M.: Metallurgiya, 1983. -112 s.
2. Severdenko V.P. Valki dlya profilnogo prokata [Tekst] / Bahtinov Yu.B., Bahtinov V.B. - M.: Metallurgiya, 1979. - 224 s.

3. Bobrov V.F. Osnovyi teorii rezaniya metallov M.: Mashinostroenie, 1975.-345s.
4. Makarov A.D. Optimizatsiya protsessov rezaniya. -M: Mashinostroenie.1976.-200s.
5. Tselikov A.I. Spetsialnyie prokatnyie stanyi [Tekst] / Barbarich M.V., Vasilchikov M.V., Granovskiy S.P., Zhunevich-Stosha E.A. - M.: Metallurgiya, 1971. -336 s
6. Melkonov L.D. Prinuditelnoe vraschayuschisya chashechniy rezets - M.: Mashinostroenie, №3, 1980. s. 19
7. Melkonov L.D. Tochenie po metodu obkatki – V kn. : «Avtomobilnaya promyshlennost», №4, 1981, s. 29
8. Melkonov L.D. Tehnologicheskoe obespechenie kachestva i tochnosti obrabotki valov prinuditelno vraschayuschimisya reztsami [Tekst] / dissertatsiya kandidata tehn. nauk /.-M: 1985g.-188s.
9. Ilyushin A.A. Soprotivlenie materialov. // Ilyushin A.A., Lenski V.S. / M: Fizmatgiz, 1959. -365 s.
10. Zorev N.N. Issledovanie elementov mehaniki protsessa rezaniya// Zorev N.N. / M: Mashgiz, 1952. -363 s.

#### Мелконов Г.Л. Визначення залежності температури різання від режимів різання і кута схрещування при чистовому точінні валів чашковими примусово обертовими різцями

*Підібрано найбільш прийнятний метод визначення температури в зоні різання. Це метод термопар. Встановлено залежність зміни температури в зоні різання від режимів різання і кута схрещування інструменту і заготовки. Наведені протоколи залежностей, за якими побудовані графіки. Приведено оптимальне значення режимів різання і кута схрещування. Наведені протоколи залежностей, за якими побудовані графіки. Наведено оптимальне значення режимів різання і кута схрещування. Метою даної роботи є визначення величини виникає температури в зоні різання. Збільшення глибини різання температура в зоні різання плавно зростає. Найбільш оптимальна температура в зоні різання при вуглі схрещування. Встановлено, що температура різання значною мірою залежить від режимів різання і кута схрещування осей оброблюваної заготовки та чашкового інструменту.*

**Ключові слова:** чашковий примусово обертається різці; метод термопар, режими різання, кут схрещування, температура в зоні різання.

#### Melkonov G. L. Determination of the temperature dependence of the cutting angle of the cutting, and when crossing finish turning of shafts rotating cutters to force cup.

*Selected the most appropriate method for determining the temperature in the cutting zone. This method of thermocouple. The dependence of temperature in the cutting zone of the cutting tool and the angle of crossing and the workpiece. These protocols are dependencies on which the graphs. We give an optimal value of the cutting angle and the crossing. Protocols dependencies, which built graphics. Given the optimal value of cutting parameters and angle of crossing. The aim of this work is to determine the magnitude of occurring temperature in the cutting zone. Increasing the depth of the cutting temperature in the cutting zone increases smoothly. The optimal temperature in the cutting zone will be at the angle of crossing. It is established that the cutting temperature largely depends on the cutting conditions and the angle of crossing of axes of the workpiece and the Cup tool. The main object of study will be temperatures encountered in*

---

*the cutting zone and changes in its value, depending on the treatment modes and the angle between the axes of workpiece and tool.*

**Keywords:** *cup forcibly rotating blades, the method of thermocouples, cutting conditions, the angle of crossing, the temperature in the cutting zone.*

**Мелконов Григорій Леонидович** - к.т.н. доцент, кафедри машинобудування, верстатів та інструментів Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, G\_melkonov@mail

*Рецензент:* **Соколов В.І.**, д.т.н., професор

Стаття подана 15.11.2015.

УДК 621.9.048

## МУЛЬТИЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ И МОДУЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ В ПРАКТИКЕ ОТДЕЛОЧНО-ЗАЧИСТНОЙ ВИБРООБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ СВОБОДНЫМИ АБРАЗИВНЫМИ СРЕДАМИ

Мицьк А.В.

## MULTIENERGY TECHNOLOGIES AND MODULAR EQUIPMENT IN THE PRACTICE OF FINISHING-GRINDING VIBRATING TREATMENT OF PARTS WITH LOOSE ABRASIVE MEDIA

Mitsyk A.V.

*Предложен комплексный подход к проектированию станков и технологий для отделочно-зачистной обработки сложнопрофильных деталей колеблющейся мелкодисперсной абразивной средой. Разработана элементная база для конструкторско-технологического синтеза автономно управляемых исполнительных механизмов в виде приспособления с деталями и резервуара, объединяемых в единый, определяемый требованиями технологического результата, агрегат модульного станка. Рассмотрена область комбинирования схем энергетических воздействий на абразивную среду и обрабатываемые детали.*

**Ключевые слова:** *отделочно-зачистная обработка, абразивная среда, модульные станки, конструкторско-технологический синтез, автономные исполнительные механизмы, элементная база, энергетическое воздействие, технологическая система.*

**Общие сведения.** Эффективность и конкурентоспособность промышленности определяется качественным и количественным составом применяемых средств машиностроительного производства [1].

Во всем мире станкостроение и сопутствующее проектирование новых прогрессивных технологий относятся к числу базовых отраслей промышленности, так как являются фондообразующими направлениями, изготавливающими средства производства для большинства приоритетных отраслей промышленности.

Вполне понятно, что уровень развития станкостроения и новых технологий в значительной степени определяет конкурентоспособность отечественного машиностроения и промышленности в целом. Долгосрочные концепции развития отраслей промышленности и обеспечивающих ими приоритетных отраслей экономики закладывают спрос на продукцию

станкостроительной промышленности, необходимую для технологического перевооружения машиностроительных предприятий.

Анализируя тенденции отечественного станочного парка необходимо отметить, что его инерционное развитие сегодня может привести к импортной зависимости, что является реальной угрозой национальной безопасности страны.

Среди технологий и соответствующего оборудования для их реализации, которые становятся все более популярными и имеют перспективы в металлообработке, можно назвать такие как, «вибрационные технологии».

Понятие «вибрационная технология» появилось сравнительно недавно, в 60-е годы прошлого столетия, как следствие развития процессов, использующих вибрационное воздействие. Возникло это понятие в сфере технологического использования низкочастотного спектра колебаний, отразив таким образом отличия его от традиционного развивающегося смежного научного направления вибрационная техника. Понятие «вибрационная технология» отражает процессы, основанные на использовании колебаний, воздействующих на объект обработки как непосредственно, так и на обрабатывающие среды, инструменты и приспособления различных характеристик [2, 3].

Согласно современным представлениям о путях получения комплекса физико-механических и физических свойств детали, ответственных за их сопротивление износу, является использование в технологических процессах различных видов энергии и схем их воздействия на детали [3].

Индикатором развития страны в производственной сфере принято считать долю в промышленном производстве обрабатывающей

промышленности с пороговым значением 70 % и доли в промышленном производстве машиностроения составляющей около 30 % [4, 5]. Сейчас эти показатели в нашей стране несколько сократились. Так, в экономике Украины доля машиностроения в общем объеме промышленной продукции за последнее десятилетие не превышает 15 % [6].

Одна из причин такого положения кроется в том, что отечественное машиностроение, связанное со множеством отделочно-зачистных операций, выполняемых на 50 – 60 % с использованием малопроизводительного ручного труда зависит от поставок комплектующих из стран ближнего зарубежья. Доля импортных комплектующих в продукции машиностроения Украины составляет 40%, в то же время такой показатель для Франции составляет 20 %, для США – 10 %, для Японии – 4 %.

Таким образом одна из главных задач машиностроительного комплекса состоит в уменьшении зависимости от других стран путем развития собственного производства необходимых компонентов для всех видов продукции приоритетных отраслей экономики Украины.

Необходимо отметить, что особенностью станкостроительного производства и технологического проектирования в области финишных отделочно-зачистных операций во всем мире является невысокая рентабельность и малая привлекательность для инвестиций. Поддержкой этих видов станкостроения во всех развитых странах занимается государство.

Однако по данным госслужбы статистики Украины [6] в Украине вследствие мирового финансового кризиса, политической нестабильности и недостатков в системе управления уровень инвестиционной активности не позволяет накапливать достаточный инвестиционный ресурс для модернизации станкостроительного производства и технологических инноваций. Можно, к сожалению констатировать, что сегодня в Украине нет заводов выпускающих современное оборудование для отделочно-зачистной обработки деталей и изделий как основного производства, так и товаров бытовой техники.

Учитывая сказанное выше украинские предприятия вынуждены приобретать упомянутое оборудование, технологии и необходимые сопутствующие материалы в Германии, Италии, Японии и других странах. К лидерам данной области станкостроения сейчас присоединился и Китай.

Стоимость такого технологического оснащения в различных случаях в зависимости от сложности технологии, вида оборудования и степени его комплектации может составлять десятки, сотни и более тысяч долларов.

Из всего вышеизложенного следует вывод, что необходимо в экстренном порядке, несмотря на

различные трудности, проявив политическую волю и активность, при существенной поддержке государства вложить средства и возродить станкостроение и технологическое проектирование, необходимое для проведения финишных отделочно-зачистных операций в изготовлении широкой номенклатуры деталей и изделий машиностроительных производств.

**Постановка задачи.** Теоретические и экспериментальные исследования по созданию и развитию мультимедийных технологий и модульного оборудования для вибрационной отделочно-зачистной обработки деталей свободной абразивной средой, подвергаемой различным энергетическим воздействиям, направлены на достижение высокой технологической гибкости, универсальности и производительности, что в целом представляет собой актуальную научно-практическую проблему обработки объемных сложнопрофильных деталей [1, 2, 4].

В этой связи, одной из первоочередных задач машиностроения и приборостроения в условиях конкуренции современного рынка техники и технологии является значительное сокращение сроков и трудоемкости технологического проектирования, изготовления и внедрения нового оборудования, механизмирующего отделочно-зачистные операции при обеспечении высоких эксплуатационных показателей обрабатываемых деталей.

**Направления проектирования модульных станков и технологий.** Сказанное ранее предполагает создание принципиально нового комплексного подхода к разработке современных мультимедийных технологий и модульных станков для отделочно-зачистной обработки. Такой подход состоит в проектно-конструкторско-технологическом синтезе исполнительных, автономно управляемых, механизмов, в виде резервуара с абразивной средой и приспособления с обрабатываемыми деталями. При проектировании эти механизмы, согласованные общим эксплуатационным назначением, выделяются из элементной базы и совместно функционируют в условиях различных схем энергетического воздействия на абразивную среду и обрабатываемые детали при их помещении в резервуар отделочно-зачистного станка в закрепленном состоянии [4, 7].

Оборудование, силовые приводы которого используют энергию вибрационной в вертикальной и горизонтальной плоскостях колебаний, центробежной, комбинированной в различных вариантах сил, а также энергию силы струйного движения потоков жидкости, до настоящего времени создавалась на основе традиционных моноблочных конструкций с низким уровнем унификации [8, 9].

Вполне понятно, что переход отделочно-зачистного оборудования на модульное проектирование, использующее принципы

агрегатирования механизмов и комбинирования схем энергетического воздействия на абразивную среду и обрабатываемые детали, потребует углубленного теоретического обоснования концептуальных методов формирования элементной базы исполнительных механизмов, проводимого с учетом интенсификации механики циркуляционного движения колеблющейся абразивной среды и особенностей ее воздействия на поверхности обрабатываемых деталей.

В предшествующих теоретических работах [10] уже проводилось научное изучение движения циркуляционного потока гранулированной абразивной среды в резервуаре станка для отделочно-зачистной обработки. Математическое моделирование было основано на физическом явлении, при котором колеблющаяся среда переходит в состояние псевдооживления или при соответствующем значении сообщаемой энергии в состоянии виброкипения. Решение, полученных при этом, упрощенных уравнений Навье-Стокса дали выражение функций Бесселя и их интегральных преобразований, что позволило обосновать сложный циклоидно-трахоидный характер кинематики процесса, на операциях обработки колеблющейся абразивной средой.

Кроме того, появилась возможность рассчитать скорости перемещения среды в любой точке резервуара станка, что необходимо для определения параметров модульных станков и технологий. Также были выявлены зоны резервуара станка с повышенным импульсным нагружением при комбинировании схем энергетического воздействия на абразивную среду и обрабатываемые детали, что создает рациональные условия формирования конструкции модульного станка из автономных исполнительных механизмов резервуара и приспособления с обрабатываемыми деталями [10].

Вместе с тем использование агрегатно-модульного принципа при создании модульных станков для отделочно-зачистной обработки впоследствии позволит рационально организовать их промышленное производство и эксплуатацию, а также упростить и ускорить проведение необходимого ремонта.

Разработка научно-практических и методических основ проектирования модульных станков для отделочно-зачистной обработки, обладающих повышенной эффективностью и эксплуатационной надежностью, базируется на двух основных направлениях исследований:

- создание элементной базы проектного конструкторско-технологического синтеза исполнительных, автономно управляемых, механизмов, выполняющих операции требуемого технологического назначения;

- обоснование и комплексный выбор рациональных сочетаний режимных параметров работы силовых приводов исполнительных механизмов применительно к грануляции

мелкодисперсных абразивных сред, шлифзерна и различных шлифпорошков, подверженных эффектам псевдооживления и виброкипения, а также применительно к условиям адаптации кинематических и динамических особенностей колебательного движения этих сред, влияющих на изменение физико-технологических свойств дефектного слоя поверхности детали при формообразовании процессами микрорезания и уруглопластического деформирования.

#### **Структура элементной базы проектного конструкторско-технологического синтеза.**

Предлагаемая авторами элементная база проектного конструкторско-технологического синтеза может в полной мере соответствовать принципам создания новых разновидностей способа виброобработки, функционально связанных с областью комбинирования, как схем энергетических воздействий, так и согласованных с ними исполнительных механизмов модульных станков для отделочно-зачистной обработки (рис. 1).

Элементная база состоит из механизмов в виде резервуаров, имеющих различную форму поперечного сечения при различных геометрических размерах (рис. 2) и механизмов в виде приспособлений с укрепленными на них обрабатываемыми деталями (рис. 3). В процессе работы при достижении определенного технологического результата исполнительные механизмы конструктивно объединяются в единый агрегат модульного станка, представляющий собой совместно функционирующую технологическую систему «резервуар с абразивной средой – приспособление с обрабатываемыми деталями» (рис. 4).

#### **Особенности мультиэнергетических технологий виброобработки.**

Развитие проектирования мультиэнергетических технологий отделочно-зачистной обработки, основанных на динамическом воздействии колеблющейся абразивной среды приводит к созданию новых разновидностей способа виброобработки.

При реализации этих разновидностей согласно вариантам оформления технологической системы «резервуар с абразивной средой – приспособление с обрабатываемыми деталями» в резервуаре модульного станка формируется энергетическое воздействие, создающее общий циркуляционный характер циклонического движения абразивной среды. В данном случае среда свободно проникает ко всем труднодоступным поверхностям обрабатываемых деталей, что приводит к высокой эффективности виброобработки.

В рассматриваемых вариантах разновидностей виброобработки, проводимых на модульных станках динамического воздействия, сделана попытка реализовать технологическую необходимость применения, в качестве абразивных сред увлажненную химически-активным раствором мелкодисперсную среду в виде шлифзерна

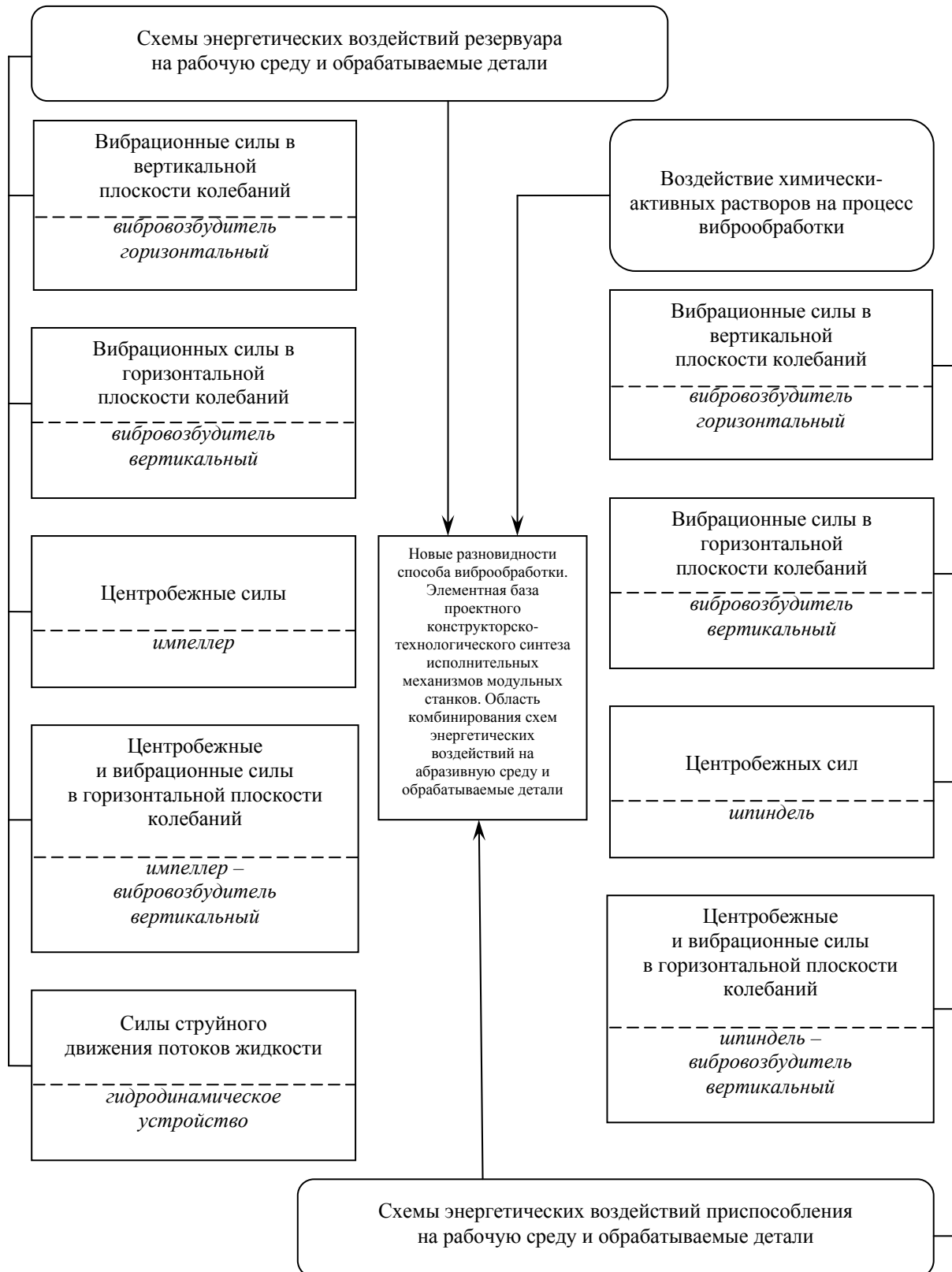
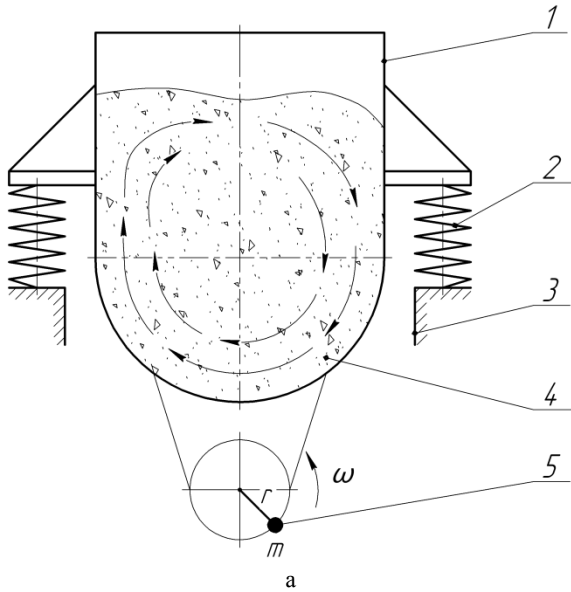
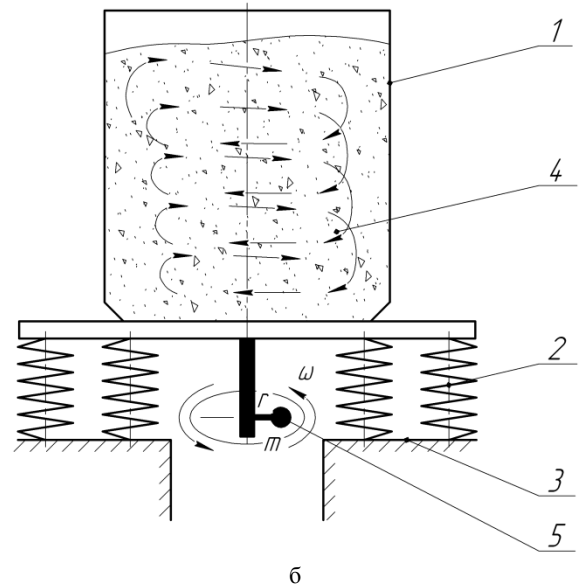


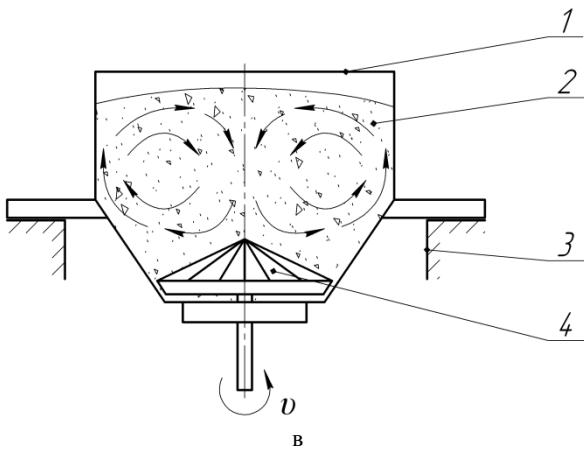
Рис. 1. Элементная база проектного конструкторско-технологического синтеза согласованных исполнительных механизмов модульных станков и технологий для отделочно-зачистной обработки



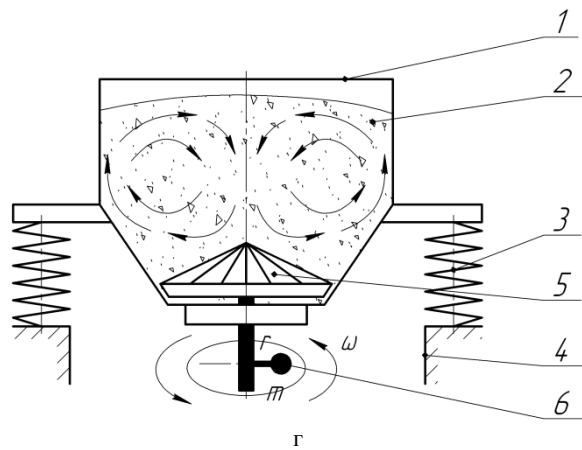
а  
1 – резервуар, 2 – подвеска, 3 – опора, 4 – рабочая среда, 5 – вибровозбудитель горизонтальный



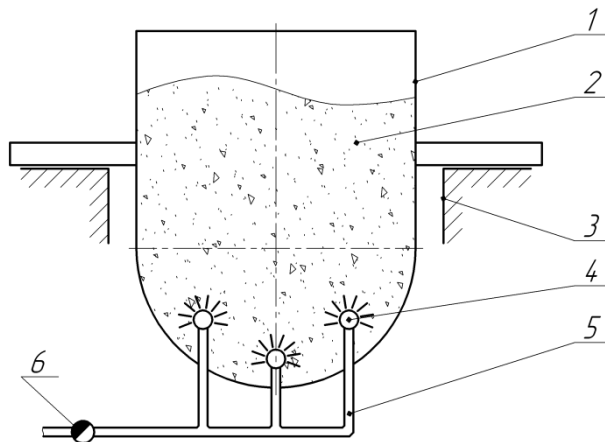
б  
1 – резервуар, 2 – подвеска, 3 – опора, 4 – рабочая среда, 5 – вибровозбудитель вертикальный



в  
1 – резервуар, 2 – рабочая среда, 3 – опора, 4 – импеллер

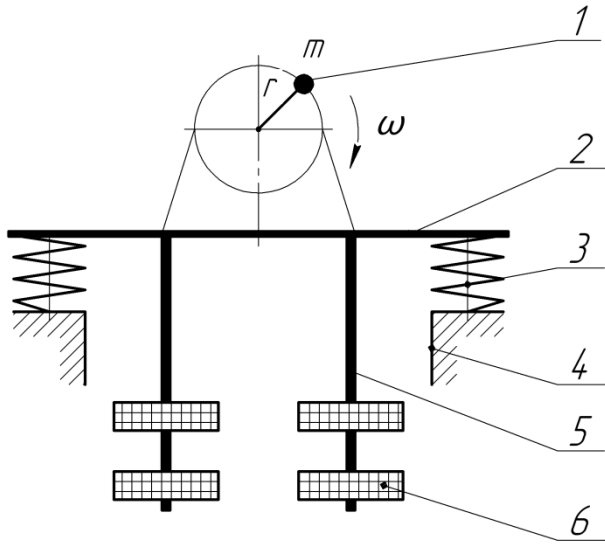


г  
1 – резервуар, 2 – рабочая среда, 3 – подвеска; 4 – опора, 5 – импеллер, 6 – вибровозбудитель вертикальный

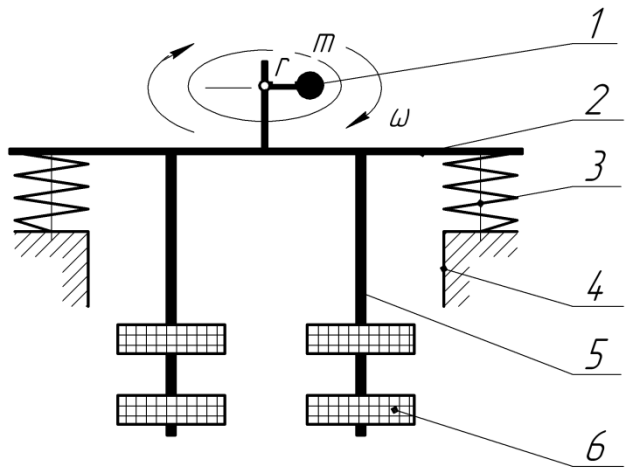


д  
1 – резервуар, 2 – рабочая среда, 3 – опора, 4 – гидродинамическое устройство, 5 – трубопровод, 6 – дроссель

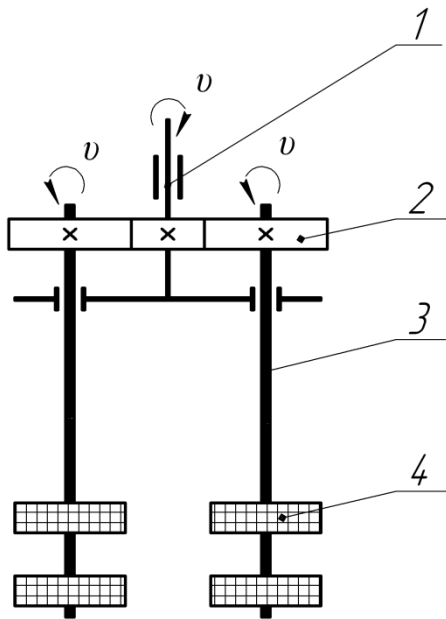
Рис. 2. Исполнительный механизм «резервуар» в технологической системе «резервуар с абразивной средой – приспособление с обрабатываемыми деталями»



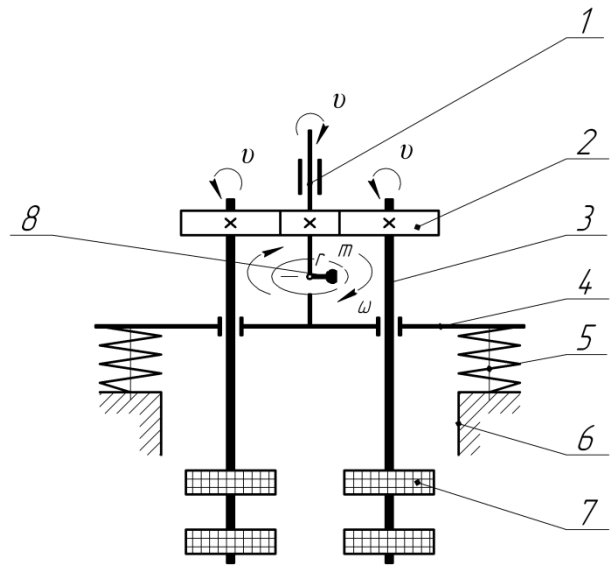
1 – вібровозбудитель горизонтальний,  
2 – приспособление, 3 – подвеска, 4 – опора,  
5 – установочные пальцы, 6 – обрабатываемые детали  
а



1 – вібровозбудитель вертикальний, 2 – приспособление,  
3 – подвеска, 4 – опора, 5 – установочные пальцы,  
6 – обрабатываемые детали  
б



1 – шпиндель, 2 – зубчатая передача, 3 – установочные пальцы, 4 – обрабатываемые детали  
в



1 – шпиндель, 2 – зубчатая передача, 3 – установочные пальцы, 4 – приспособление, 5 – подвеска,  
6 – опора, 7 – обрабатываемые детали,  
8 – вібровозбудитель горизонтальний  
г

Рис. 3. Исполнительный механизм «приспособление» в технологической системе «резервуар с абразивной средой – приспособление с обрабатываемыми деталями»

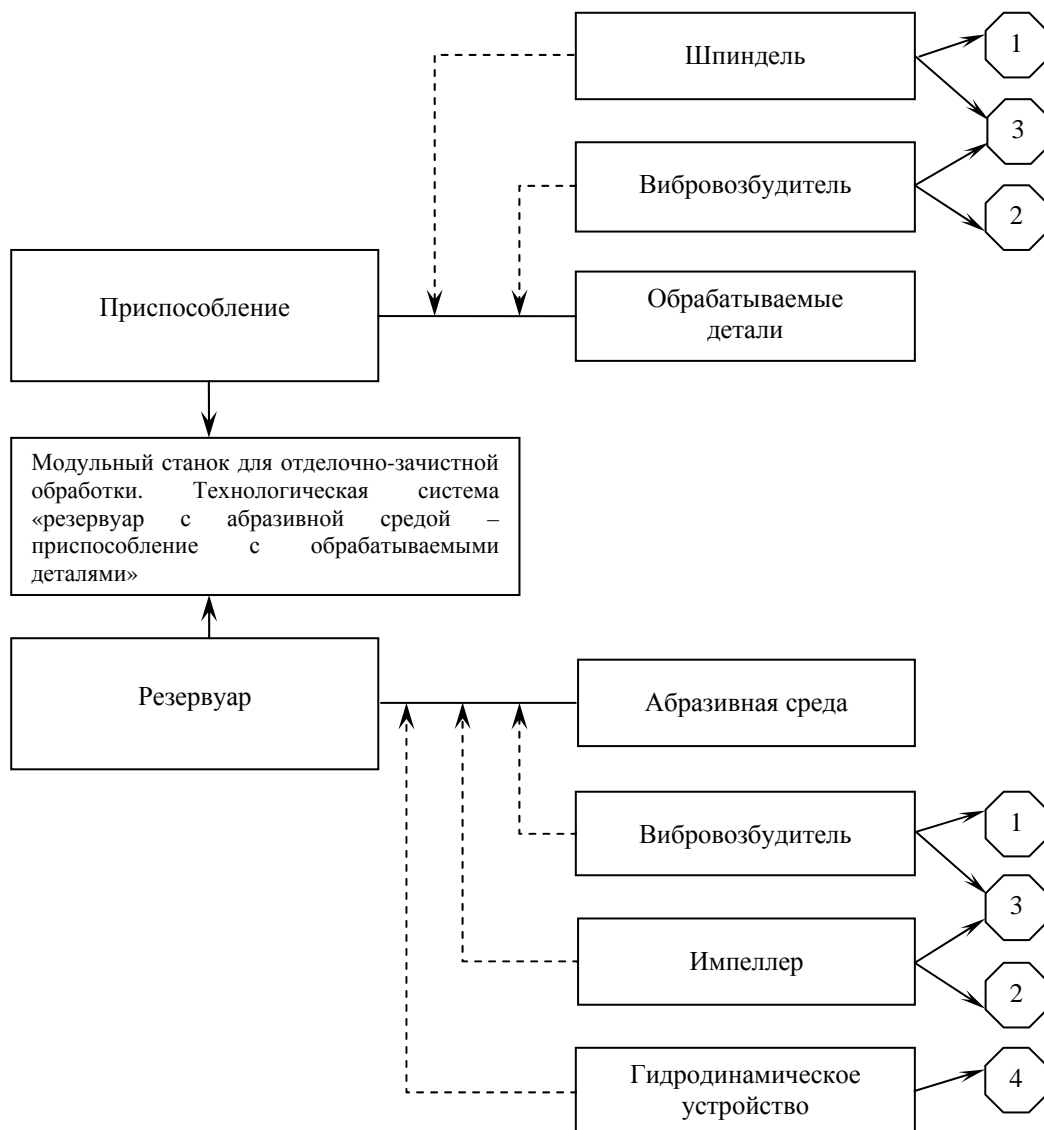


Рис. 4. Варианты проектного конструкторско-технологического синтеза исполнительных механизмов модульного станка и оформления технологической системы «резервуар с абразивной средой – приспособление с обрабатываемыми деталями»

зернистостью 200...40 и шлифпорошков зернистостью 32...16, а также абразивных и увлажненную химически-активным раствором мелкодисперсную среду в виде шлифзерна зернистостью 200...40 и шлифпорошков зернистостью 32...16, а также абразивных и металлических гранул размером не более 2 мм. Формообразующие свойства таких сред, обеспечивающие микрорезание и упругопластическое деформирование, проявляются при равномерном и стабильном контакте с обрабатываемой поверхностью любой сложности [11].

Наиболее полное использование режущих свойств абразивной среды в процессе виброобработки деталей со сложной и объемной

формой поверхности стало возможным за счет наличия в элементной базе исполнительных механизмов с общим техническим решением. Это решение состоит в том, что обрабатываемые детали поотдельности или пакетами базируют и закрепляют на расположенных рядами или карусельно установочных пальцах многоместного приспособления, смонтированного на виброплощадке или шпинделе с возможностью погружения в рабочую зону резервуара, заполненного абразивной средой, движущейся под влиянием различных схем энергетического воздействия.

Дополнительно следует отметить, что принятый принцип установки обрабатываемых деталей в резервуаре модульного станка

способствует возникновению эффекта встречного движения потоков абразивной среды с нейтральными слоями между ними. В этих слоях ориентируют установочные пальцы приспособления с обрабатываемыми деталями, выполняющими функции колеблющихся и вращающихся дефлекторов, создающих в абразивной среде зоны циклонического движения со сложной несимметричной траекторией и большими вибрационными ускорениями, достигающими 25...30g, где  $g$  – ускорение силы земного притяжения.

При наличии дефлекторов в содержимом резервуара возрастают скорости относительного перемещения и взаимного давления абразивной среды и обрабатываемых деталей, что положительно сказывается на активности обработки сложнопрофильных участков поверхности деталей, с которых при комплексном использовании энергии вибрационных и центробежных сил, а также сил воздействия струйного потока жидкости, удаляется дефектный слой металла с одновременным уменьшением шероховатости.

**Эффективность модульных станков и мультиэнергетических технологий виброобработки.** Эффективное использование модульных станков и мультиэнергетических технологий виброобработки обеспечивается при выборе рациональных сочетаний значений регулируемых параметров таких, как амплитуда и частота колебаний вибровозбудителя, варьируемых в пределах 0,2...3,0 мм и 30...70 Гц, а также скорости вращения импеллера и шпинделя в пределах 31,5...1440 об/мин, назначаемых исходя из требований результата выполняемых технологических операций.

Следует также отметить, что при всех прочих условиях немаловажную роль в интенсификации отделочно-зачистной виброобработки играет грануляция абразивной среды, а также эффективность воздействия применяемых химически-активных растворов.

Качественная и количественная интенсификация наблюдается при всех, определенных нами, новых разновидностях способа виброобработки, которые сформированы при комбинировании схем энергетического воздействия на абразивную среду и обрабатываемые детали и реализуются на модульных станках динамического воздействия для отделочно-зачистной обработки в колеблющихся абразивных средах. Интенсивность удельного съема металла при экспериментальной виброобработке согласно предложенным авторами статьи техническим нововведениям возросла в 1,8...2,4 раза в сравнении с традиционным виброобрабатывающим оборудованием и технологиями [4].

**Выводы.** Таким образом, можно заключить, что сказанное выше дает основание для дальнейшего научного изучения, а также технического и технологического проектирования новых модульных станков и мультиэнергетических технологий отделочно-зачистной обработки, получаемых при проектно-конструкторско-технологическом синтезе согласованных исполнительных, автономно управляемых, механизмов в соответствии с принципом комбинирования различных схем энергетического воздействия на абразивную среду и обрабатываемые детали, определяемого требуемым финишным результатом технологического процесса отделочно-зачистной обработки.

#### Л и т е р а т у р а

1. Бабичев А.П. Основы вибрационной технологии / А.П. Бабичев, И.А. Бабичев. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2008. – 694 с.
2. Применение вибрационных технологий на операциях отделочно-зачистной обработки деталей (очистка, мойка, удаление облоя и заусенцев, обработка кромок) / А.П. Бабичев, П.Д. Мотренко, Л.К. Гиллеспи и др.; под ред. А.П. Бабичева. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2010. – 289 с.
3. Gillespie, LaRoux, Deburring and Edge Finishing Handbook, SME, Dearborn, MI, 1999.
4. Мицьк А.В. Пути интенсификации вибрационной отделочно-зачистной обработки комбинированием схем энергетических воздействий на рабочую среду и детали / А.В. Мицьк, В.А. Федорович // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2011. – № 6 (83). – С. 26 – 34.
5. Мазур М.П. Основы теории резания материалов: підручник [для вищ. навч. закладів] / М.П. Мазур, Ю.М. Внуков, В.Л. Доброскок, В.О. Залого, Ю.К. Новоселов, Ф.Я. Якубов; під заг. ред. М.П. Мазур. – Львів: Новий Світ – 2000, 2010. – 422 с.
6. [www.ukrstat.gov.ua](http://www.ukrstat.gov.ua)
7. Развитие вопросов кинематики и динамики процессов отделочно-зачистной обработки в колеблющемся резервуаре / Мицьк А.В., Федорович В.А., Фадеев В.А. // *Резание и инструмент в технологических системах: Межд. научн. техн. сб.* – Харьков: НТУ «ХПИ», 2012. – Вып. 82. – С. 171 – 182.
8. Наладка и эксплуатация станков для вибрационной обработки / [Бабичев А.П., Рысева Т.Н., Самадуров В.А. и др.]; под ред. А.П. Бабичева. – М.: Машиностроение, 1988. – 64 с.
9. Калмыков М.А. Вибрационные станки и их классификация / М.А. Калмыков, Г.Ю. Бурлакова, Д.В. Молчанов // *Вібрації в техніці та технологіях*. – 2010. – № 3 (59). – С. 24 – 31.
10. Mamalis AG, Grabchenko AI, Mitsyk AV, Fedorovich VA, Kundrak J (2013) Mathematical simulation of motion of working medium at finishing–grinding treatment in the oscillating reservoir. *Int J Adv Manuf Technol* 68:1235–1250
11. Пат. 69657 Україна, МПК В24В 31/06 Спосіб віброобробки деталей / А.В. Міцьк; Заявл. 07.11.11; Опубл. 10.05.12, Бюл. № 9.

## References

1. Babichev A.P. Osnovy vibracionnoj tehnologii / A.P. Babichev, I.A. Babichev. – Rostov n/D: Izdatel'skij centr DGTU, 2008. – 694 s.
2. Primenenie vibracionnyh tehnologij na operacijah otdelochno-zachistnoj obrabotki detalej (ochistka, mojka, udalenie obloja i zausencev, obrabotka kromok) / A.P. Babichev, P.D. Motrenko, L.K. Gillespi i dr.; pod red. A.P. Babicheva. – Rostov n/D: Izdatel'skij centr DGTU, 2010. – 289 s.
3. Gillespie, LaRoux, Deburring and Edge Finishing Handbook, SME, Dearborn, MI, 1999.
4. Micyk A.V. Puti intensivizacii vibracionnoj otdelochno-zachistnoj obrabotki kombinovaniem shem jenergeticheskikh vozdeystvij na rabochuju sredu i detali / A.V. Micyk, V.A. Fedorovich // Aviacijno-kosmichna tehnika i tehnologija. – 2011. – № 6 (83). – S. 26 – 34.
5. Mazur M.P. Osnovi teorii rizannja materialiv: pidruchnik [dlja vishh. navch. zakladiv] / M.P. Mazur, Ju.M. Vnukov, B.L. Dobroskok, V.O. Zaloga, Ju.K. Novoselov, F.Ja. Jakubov; pid zag. red. M.P. Mazur. – L'viv: Novij Svit – 2000, 2010. – 422 s.
6. [www.ukrstat.gov.ua](http://www.ukrstat.gov.ua)
7. Razvitie voprosov kinematiki i dinamiki processov otdelochno-zachistnoj obrabotki v kolebljushhemsja rezervuare / Micyk A.V., Fedorovich V.A., Fadeev V.A. // Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah: Mezhd. nauchn. tehn. sb. – Har'kov: NTU «HPI», 2012. – Vyp. 82. – S. 171 – 182.
8. Naladka i jekspluatacija stankov dlja vibracionnoj obrabotki / [Babichev A.P., Ryseva T.N., Samadurov V.A. i dr.]; pod red. A.P. Babicheva. – M.: Mashinostroenie, 1988. – 64 s.
9. Kalmykov M.A. Vibracionnye stanki i ih klassifikacija / M.A. Kalmykov, G.Ju. Burlakova, D.V. Molchanov // Vibracii v tehnicе ta tehnologijah. – 2010. – № 3 (59). – S. 24 – 31.
10. Mamalis AG, Grabchenko AI, Mitsyk AV, Fedorovich VA, Kundrak J (2013) Mathematical simulation of motion of working medium at finishing–grinding treatment in the oscillating reservoir. Int J Adv Manuf Technol 68:1235–1250
11. Pat. 69657 Ukraїna, MPK V24V 31/06 Sposib vibroobrobki detalej / A.V. Micik; Zajavl. 07.11.11; Opubl. 10.05.12, Bjul. № 9.

**Міцик А.В. Мультиенергетичні технології та модульне обладнання в практиці оздоблювально-зачищувальної віброобробки деталей вільним абразивним середовищем**

*Запропоновано комплексний підхід до проектування верстатів та технологій для оздоблювально-зачищувальної обробки складнопрофільних деталей дрібнодисперсним абразивним середовищем. Розроблено елементна база для конструкторсько-технологічного синтезу автономно керованих виконавчих механізмів у вигляді пристосування з деталями і резервуара, що об'єднуються в єдиний, який визначається вимогами технологічного результату, агрегат модульного верстата. Розглянуто область комбінування схем енергетичних впливів на абразивну середовище та оброблювані деталі.*

**Ключові слова:** оздоблювально-зачищувальна обробка, абразивне середовище, модульні верстати, конструкторсько-технологічний синтез, автономні виконавчі механізми, елементна база, енергетичний вплив, технологічна система.

**Mitsyk A.V. Multienergy technologies and modular equipment in the practice of finishing-grinding vibrating treatment of parts with loose abrasive media**

*A complex approach is proposed to designing machines and technologies for finishing-grinding treatment of complex-shaped parts by an oscillating fine-dispersed abrasive medium. A designed element base has been developed for the design-technological synthesis of the autonomously controlled actuating mechanisms in the form of the device with the processed parts and the reservoir, combined into a single aggregate modular machine. The field of combining schemes of the power actions on an abrasive medium and processed parts has been considered.*

**Keywords:** finishing-grinding treatment, abrasive medium, modular machines, design-technological synthesis, autonomous actuating mechanisms, element base, power actions, technological system.

**Мицьк Андрей Владимирович** – к.т.н., доцент, доцент кафедри машинобудування, верстатів та інструментів Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, [an.mitsyk@gmail.com](mailto:an.mitsyk@gmail.com)

*Рецензент: Носко П.Л., д.т.н., проф.*

Стаття подана 29.10.2015.

УДК 504.064.38

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ ГАЗОВ, ВЫДЕЛЯЕМЫХ ПРИ ЗАТОПЛЕНИИ ШАХТ

Никитченко И.В, Шведчикова И.А.

## COMPARATIVE ANALYSIS OF THE METHODS FOR MONITORING OF POTENTIALLY DANGEROUS GASES PRODUCED BY FLOODED MINES

Nikitchenko I.V. Shvedchikova I.A.

*В статье показано, что наибольшую опасность для живых организмов представляют образующиеся при затоплении шахт газы: метан, окись углерода, углекислый газ, диоксид азота, сероводород, диоксид серы. Отмечено, что для регистрации опасных газов, выделяемых при затоплении шахт, а также для определения их концентраций существует достаточно большое количество методов. Выполнен сравнительный анализ механических, акустических, тепловых, магнитных, оптических, ионизационных, масс-спектрометрических, электрохимических и полупроводниковых методов. Определены требования, предъявляемые к методам контроля потенциально опасных газов. Установлено, что в наибольшей степени указанным требованиям удовлетворяют акустические, тепловые, оптические и электрохимические методы контроля.*

**Ключевые слова:** затопление шахты, метод, газовый анализ, контроль.

**Введение.** Обычно при ликвидации шахты предусматриваются меры по предупреждению проявления всех действующих на шахте опасных и вредных факторов. В настоящее время на территории Донецкой и Луганской областей насчитывается более 50-ти закрытых угольных шахт, большинство из которых прекратили свою работу из-за ведения военных действий. Закрытие таких шахт выполнялось, в основном, путем «мокрой» консервации, когда выработанное пространство постепенно заполняется водой из подработанных водоносных пластов [1]. При этом газы, находящиеся в выработанном пространстве, вытесняются водой к земной поверхности. Газовыделение из закрытых путем «мокрой консервации» шахт обнаруживается в течение от одного года до нескольких десятилетий после прекращения принудительного проветривания и засыпки стволов и продолжается вплоть до полного затопления выработанного пространства [2, 3].

В условиях военных действий на востоке Украины проблема своевременного обнаружения

газов, выделяемых при затоплении шахт и представляющих зачастую катастрофическую опасность для жизнедеятельности людей, приобретает особую актуальность.

Целью работы является изучение и сравнительный анализ существующих методов газового анализа; разработка рекомендаций по применению указанных методов для обнаружения потенциально опасных газов, выделяемых при ликвидации и затоплении шахт.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Ярембаш И.Ф. в работе [4] отмечает важность проблемы контроля параметров шахтных вод, в частности, контроля взрывоопасных газов, образующихся при затоплении шахт. В публикациях Матлака Е.С. [5] и Запольского А.К. [6] рассмотрены вопросы контроля и снижения уровня загрязненности шахтных вод в подземных условиях для их дальнейшего использования. Поиску перспективных технологических решений во время экологически безопасного закрытия угольных шахт посвящена работа [7].

Таким образом, анализ последних публикаций показал, что вопрос контроля потенциально опасных газов, выделяемых при затоплении шахт, остается открытым и требует дальнейших исследований.

**Материалы и результаты исследования.** В закрытых шахтах, как показывает практика, наблюдается выделение целого ряда опасных газов, в частности, метана ( $\text{CH}_4$ ), оксида углерода ( $\text{CO}$ ), углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ), диоксида азота ( $\text{NO}_2$ ), сероводорода ( $\text{H}_2\text{S}$ ), диоксида серы ( $\text{SO}_2$ ). Большая концентрация этих газов в шахтных выработках нередко приводит к взрывам и заражению питьевой воды [5]. В закрытых шахтах встречается также «мёртвый воздух», представляющий собой опасную для живых организмов смесь углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) и азота ( $\text{N}_2$ ). Причиной появления «мертвого воздуха» являются химические процессы, происходящие в подземном выработанном

пространстве. «Мёртвый воздух» может оказаться на поверхности, в том числе в подвалах жилых зданий и колодцах, поднимаясь через многочисленные трещины и пустоты в земле [9, 10].

В настоящее время существует ряд методов газового анализа, которые по характеру измеряемого физического параметра подразделяют на механические, акустические, тепловые, магнитные, оптические, ионизационные, масс-спектрометрические, электрохимические, полупроводниковые [8]. Рассмотрим их более подробно.

К механическим методам относится волюмоманометрический метод, основанный на измерении объема или давления газовой пробы после химического воздействия на нее, которое может заключаться, например, в последовательном поглощении компонентов анализируемого газа подходящими реагентами в поглотительных сосудах. Минимально определяемые концентрации (МОК) газов составляют от 0,001 до 0,01 %. К механическим методам также относят пневматический метод (аэростатический и аэродинамический методы). Эти методы применяют для анализа бинарных и псевдобинарных смесей.

Акустические методы основаны на измерении поглощения или скорости распространения звуковых и ультразвуковых волн в газовой смеси. Методы не избирательны и применяются, в частности, для определения метана ( $\text{CH}_4$ ) и водорода ( $\text{H}_2$ ) в бинарных и псевдобинарных смесях. МОК методов составляет от 0,001 до 0,1 % [11].

Тепловые методы основаны на измерении теплопроводности газовой смеси (термокондуктометрический метод) или теплового эффекта радиации с участием определяемого компонента (термохимический метод). Термокондуктометрическим методом находят содержание диоксида углерода ( $\text{CO}_2$ ), водорода ( $\text{H}_2$ ), метана ( $\text{CH}_4$ ) в бинарных и псевдобинарных смесях (МОК от 0,01 до 0,1%). Термохимический метод используют для избирательного определения угарного газа ( $\text{CO}$ ), метана ( $\text{CH}_4$ ), кислорода ( $\text{O}_2$ ), водорода ( $\text{H}_2$ ), контроля в воздухе взрывоопасных и пожароопасных примесей (смесей газообразных углеводородов, паров бензина и т.д.).

С помощью магнитных методов измеряют физические характеристики газа, обусловленные магнитными свойствами определяемого компонента в магнитном поле. С их помощью контролируют содержание кислорода  $\text{O}_2$ , отличающегося аномально большой парамагнитной восприимчивостью. Наиболее распространены термомагнитный метод, основанный на зависимости парамагнитной восприимчивости  $\text{O}_2$  от его концентрации при действии магнитного поля в условиях температурного градиента. МОК метода – от 0,01 до 0,1 %.

С использованием оптических методов измеряют оптическую плотность (абсорбционные

методы), интенсивность излучения (эмиссионные методы), коэффициент преломления (рефрактометрический метод). Так же существуют фотоколориметрический оптический метод, но он не так широко распространён в сравнении с другими методами.

Абсорбционные методы, основанные на измерении селективного поглощения инфракрасного (ИК) и ультрафиолетового (УФ), видимого излучения контролируемым компонентом. Применяют методы, например, для избирательного определения окиси азота ( $\text{NO}_2$ ), озона ( $\text{O}_3$ ), сероводорода ( $\text{H}_2\text{S}$ ), окиси серы ( $\text{SO}_2$ ), оксида серы ( $\text{CS}_2$ ), формальдегида, фосгена, паров ртути ( $\text{Hg}$ ), натрия ( $\text{Na}$ ), свинца ( $\text{Pb}$ ) и других. МОК метода – от 0,00001 до 0,01%.

Эмиссионные оптические методы применяют для количественного определения множества элементов и соединений, измеряя интенсивность излучения компонентов. Излучение можно возбудить электрическим разрядом (МОК метода от 0,0001 до 0,1 %), пламенем, светом и другими источниками (при использовании лазера МОК достигает 0,0000001 до 0,000001 %).

Рефрактометрический метод используется для определения  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , ацетилена,  $\text{SO}_2$  и др. в бинарных и псевдобинарных смесях. МОК метода около 0,01 %. Интерферометрический оптический метод основан на измерении смещения интерференционных полос в результате изменения оптической плотности газовой смеси при изменении концентрации определяемого компонента. Применяется для определения  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  в воздухе. МОК метода около 0,01 %.

При фотоколориметрическом оптическом методе предварительно проводят цветную реакцию контролируемого компонента с подходящим реагентом в газовой фазе, в индикаторном реакторе или на поверхности твердого носителя (в виде ленты, таблетки, порошка) и измеряют интенсивность окраски продуктов реакции. Метод применяют также для избирательного определения оксидов азота,  $\text{CO}$ ,  $\text{CS}_2$ ,  $\text{NH}_3$ , ацетилена, фосгена, формальдегида и др. МОК метода от 0,000001 до 0,001%.

Широко используется комбинированный оптико-акустический метод, основанный на пульсации давления газа в приемнике излучения при поглощении прерывистого потока излучения, прошедшего через анализируемый газ. Метод позволяет определять  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{SO}_2$ , ряд органических соединений. МОК метода – от 0,001 до 0,01 %. Источники излучения в абсорбционных методах – лампы накаливания, ртутные, водородные, ртутно-кадмиевые, кадмиевые, нихромовые спирали [8].

Ионизационные методы основаны на измерении электрической проводимости ионизированных газовых смесей. Ионизацию осуществляют радиоактивным излучением, электрическим разрядом, пламенем, УФ-

излучением, на нагретой каталитически активной поверхности. Например, метод, основанный на измерении разницы сечений ионизации газов радиоактивным излучением, используют для анализа таких бинарных смесей, как  $H_2-N_2$ ,  $N_2-CO_2$ , а также некоторых углеводородов (МОК метода около 0,01 %). Метод, основанный на ионизации органических соединений в водородном пламени, применяют для определения органических примесей в бинарных газовых смесях и воздухе (МОК метода около 0,00001 %).

Масс-спектрометрические методы, основанные на измерении масс ионизованных компонентов анализируемого газа, применяют для определения инертных газов,  $O_2$ ,  $H_2$ , оксидов углерода, азота и серы, а также неорганических, органических и металлоорганических летучих соединений. МОК метода от 0,00001 до 0,001 % [12].

Электрохимическими методами измеряют параметры системы, состоящей из жидкого или твердого электролита, электродов и определяемого компонента газовой смеси или продуктов его реакции с электролитом. Так, потенциометрический метод основан на зависимости потенциала индикаторного электрода от концентрации иона, полученного при растворении определяемого компонента в растворе; амперометрический – на зависимости между током и количеством определяемого компонента, прореагировавшего на индикаторном электроде; кондуктометрический – на измерении электропроводности растворов при поглощении ими определяемого компонента газовой смеси. Электрохимическими методами измеряют содержание примесей  $O_2$ ,  $CO$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $SO_2$ ,  $H_2S$ ,  $H_2$ ,  $Cl_2$ ,  $NH_3$ ,  $O_3$  и др. МОК метода от 0,000001 до 0,0001 %.

Полупроводниковыми методами измеряют сопротивление полупроводника (пленки или монокристалла), взаимодействующего с определяемым компонентом газовой смеси. Методы применяют для измерения содержания  $H_2$ , метана, пропана,  $O_2$ , оксидов углерода и азота, галогенсодержащих соединений и др. МОК метода от 0,00001 до 0,001 % [8].

Среди методов газового анализа иногда выделяют так называемые комбинированные. К ним относятся методы, отличающиеся способами предварительного преобразования пробы (хроматография, изотопное разбавление), которые могут сочетаться с измерением различных физических параметров, а также многопараметрический вычислительный метод.

В хроматографических методах газового анализа разделение анализируемой смеси происходит при ее движении вдоль слоя сорбента. Наиболее часто применяют проявительный вариант, в котором исследуемый газ переносится через слой сорбента потоком газа-носителя, сорбирующегося хуже любого из компонентов анализируемой газовой смеси. Для измерения концентрации

разделенных компонентов в газе-носителе применяют различные детекторы. Хроматографические методы обеспечивают анализ широкого круга органических и неорганических компонентов с МОК метода от 0,0001 до 0,01 %. Сочетание хроматографического разделения с предварительным концентрированием (криогенной адсорбцией, диффузией и др.) определяемых компонентов позволяет снизить значения МОК метода от 0,0000001 до 0,000001 % [13].

В методе изотопного разбавления в анализируемую пробу вводят радиоактивные или, чаще, стабильные изотопы определяемого компонента и затем выделяют его из пробы вместе с добавкой. В случае радиоактивного изотопа концентрацию компонента рассчитывают по удельной радиоактивности выделенного компонента, в случае стабильных изотопов – по результатам масс-спектрометрического или спектрального анализа его изотопного состава. Применяется также метод, основанный на реакции между определяемым компонентом и радиоактивным реагентом. Образовавшееся соединение выделяют, измеряют его удельную активность, по значению которой находят концентрацию определяемого компонента. Методами изотопного разбавления измеряют содержание примесей  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $H_2$ , оксидов углерода и азота,  $CH_4$ ,  $Cl_2$  и др. МОК от метода от 0,0000001 до 0,1 % [13].

Многопараметрический вычислительный метод основан на совместном измерении ряда физических параметров смеси известного качественного состава и на решении с помощью ЭВМ системы уравнений, описывающих взаимосвязь измеряемых параметров с концентрациями определяемых компонентов. Одновременно можно измерять, например, оптическую плотность среды при различных длинах волн, эффективность ионизации газов и паров на каталитически активных поверхностях с разными температурами нагрева и т.д.

В результате проведенного выше анализа методов, используемых для определения состава газов и их концентрации, установлено, что для контроля потенциально опасных газов, выделяемых при затоплении шахт (прежде всего,  $CH_4$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$ ), возможно применение только некоторых из них, которые удовлетворяют следующим требованиям:

1. Обнаружение опасных концентраций таких газов, как метан ( $CH_4$ ), оксид углерода ( $CO$ ), углекислый газ ( $CO_2$ ), диоксид азота ( $NO_2$ ), сероводород ( $H_2S$ ), диоксид серы ( $SO_2$ ), а также обнаружение присутствия «мертвого воздуха», т.е. смеси углекислого газа ( $CO_2$ ) и азота ( $N_2$ ).

2. Возможность дистанционного контроля газов.

3. Высокая чувствительность (МОК метода от 0,001 до 0,01 %.)

4. Возможность приборной реализации метода.

Таблица

## Сравнительный анализ методов контроля потенциально опасных газов

Методы газового анализа	Определяемые Газы	Преимущества	Недостатки
Акустические методы	CH <sub>4</sub> , O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub>	Методы не избирательны и применяются, в частности, для определения газов в бинарных и псевдобинарных смесях. Метод имеет высокую чувствительность. Возможность проведения экспресс анализа.	Сложность в организации дистанционного контроля.
Тепловые методы: термокондуктометрический; термохимический	He, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> CO, O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub>	Дистанционный контроль. Высокая чувствительность.	Принцип теплопроводности, используемый в этих методах, не обеспечивает необходимую избирательность, может быть использован лишь при резком отличии теплопроводности определяемого компонента от остальных составляющих смеси
Оптические методы (оптико-абсорбционные)	NO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> S, SO <sub>2</sub> , CS <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , NH <sub>3</sub>	Включают в себя большую группу спектральных методов анализа, что даёт возможность определения разнообразных газов. Возможность проведения экспресс анализа.	Недостаточный диапазон измеряемых концентраций.
Электрохимические методы	O <sub>2</sub> , CO, NO, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, H <sub>2</sub> , Cl <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> , O <sub>3</sub>	Высокая точность и чувствительность метода. Определение широкого спектра газов.	Большая трудоемкость и длительность проведения анализа, необходимость наличия дорогостоящей аппаратуры

## 5. Проведение экспресс анализа.

В наибольшей степени указанным требованиям удовлетворяют акустические, тепловые, оптические и электрохимические методы. Так как в закрытых шахтах доступ к горным выработкам затруднен, то для анализа концентрации газов и определения их состава целесообразно использовать методы, позволяющие проводить дистанционный контроль, в частности, оптические методы. Тепловые, оптические и электрохимические методы являются основными для определения концентраций таких опасных газов, как CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>. Именно эти газы выделяются в значительных количествах при затоплении шахтных выработок. В табл. выполнен сравнительный анализ указанных методов.

**Выводы.** Анализ методов измерения концентрации и состава газов позволил выделить четыре группы методов, в наилучшей степени удовлетворяющих требованиям контроля потенциально опасных газов, выделяемых при закрытии шахт. В результате проведенного анализа установлено, что наиболее приемлемыми для контроля газов в закрытых шахтах являются оптические методы, т.к. эти методы удовлетворяют таким важным требованиям, как широкий спектр определяемых газов и возможность их использования для дистанционного контроля.

Направлением дальнейших исследований следует считать исследование принципов построения оптических приборов газового анализа.

## Л и т е р а т у р а

1. Донбасс в шаге от экологической катастрофы: воды затопленных шахт могут разрушить дома, а хлор – уничтожить все живое [Электронный ресурс] –Режим доступу до ресурсу: <http://www.segodnya.ua/regions/donetsk/donbass-v-shage-ot-ekologicheskoy-katastrofy-vody-iz-zatoplennyh-shaht-mogut-razrushit-doma-a-hlor-unichtozhit-vse-zhivoe-625841.html>
2. Нікітченко І.В., Прокопенко Н.Ю. Вплив військових конфліктів на навколишнє середовище та екологію. Матеріали міжнар.наук.-техн. конф., 17-18 квіт. 2015 р., м. Северодонецьк. Ч. I / [укл. : Тарасов В.Ю.]. – Северодонецьк : [Технол. ін-т Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля (м. Северодонецьк)],с.153-156.
3. Нікітченко І.В., Шведчикова І.О.Екологічні проблему у постраждалих від конфлікту районах сходу України. Матеріали міжнародної наук.-техн. конф.2015 р., м. Кременчук.
4. Ярембаша И. Ф. Технология закрытия (ликвидации) угольных шахт / И. Ф. Ярембаша. – Донецк: Норд-Пресс, 2004. – 238 с.
5. Матлак Е. С. Снижение загрязненности шахтных вод в подземных условиях / Е. С. Матлак, В. В. Малеев. – К: Техника, 1991. – 136 с.
6. Запольський А. К. Водопостачання, водовідведення та якість води / А. К. Запольський. – К: Вища шк, 2005. – 671 с.
7. Вибір та обґрунтування на основі експертної оцінки перспективних напрямків технологічних рішень під час екологічно безпечного закриття вугільних шахт / Геотехнології та управління виробництвом ХХІ століття. Монографія в 2 т., т.2., Донецьк.: ДонНТУ, 2006. – с.227-231.

8. Кулаков М. В. Технологические измерения и приборы для химических производств / М. В. Кулаков. – Москва, 1983.
9. Мёртвый воздух [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: [http://miningwiki.ru/wiki/%D0%9C%D1%91%D1%80%D1%82%D0%B2%D1%8B%D0%B9\\_%D0%B2%D0%BE%D0%B7%D0%B4%D1%83%D1%85](http://miningwiki.ru/wiki/%D0%9C%D1%91%D1%80%D1%82%D0%B2%D1%8B%D0%B9_%D0%B2%D0%BE%D0%B7%D0%B4%D1%83%D1%85).
10. Шведчикова И. В. Принципы построение системы экологичного мониторинга параметров шахтных вод... / И. В. Шведчикова, И. В. Никитченко. // Вісник Національного технічного університету «ХПІ».. – 2015. – С. 89–96.
11. Коллеров Д.К., Метрологические основы газоаналитических измерений, М., 1967
12. Павленко В. А. Газоанализаторы / В. А. Павленко. – Москва, 1965.
13. Харитонов Ю. Я. Аналитическая химия. Аналитика 2. Количественный анализ. Физико-химические (инструментальные) методы анализа / Ю. Я. Харитонов., 2014. – 656 с
14. Подрухин А.А. Исследование миграции метана на дневную поверхность в пределах горного отвода ликвидированной шахты «Кочегарка» / Сб.: Физико-технические проблемы горного производства/ Вып. №9. Под общей редакцией А.Д. Алексеева. - Донецк: ИФГП НАНУ, 2006. – с. 196.
9. Mervyy vozdukh [Elektronniy resurs] – Rezhim dostupu do resursu: [http://miningwiki.ru/wiki/%D0%9C%D1%91%D1%80%D1%82%D0%B2%D1%8B%D0%B9\\_%D0%B2%D0%BE%D0%B7%D0%B4%D1%83%D1%85](http://miningwiki.ru/wiki/%D0%9C%D1%91%D1%80%D1%82%D0%B2%D1%8B%D0%B9_%D0%B2%D0%BE%D0%B7%D0%B4%D1%83%D1%85).
10. Shvedchikova I. V. Printsipy postroenie sistemy ekologichnogo monitoringa parametrov shakhtnykh vod... / I. V. Shvedchikova, I. V. Nikitchenko. // Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu «KhPI».. – 2015. – S. 89–96.
11. Kollerov D.K., Metrologicheskie osnovy gazoanaliticheskikh izmereniy, M., 1967
12. Pavlenko V. A. Gazoanalizatory / V. A. Pavlenko. – Moskva, 1965.
13. Kharitonov Yu. Ya. Analiticheskaya khimiya. Analitika 2. Kolichestvennyy analiz. Fiziko-khimicheskie (instrumental'nye) metody analiza / Yu. Ya. Kharitonov., 2014. – 656 s
14. Podrukhin A.A. Issledovanie migratsii metana na dnevnuyu poverkhnost' v predelakh gornogo otvoda likvidirovannoy shakhty «Kochegarka» / Sb.: Fiziko-tekhnicheskie problemy gornogo proizvodstva/ Вып. №9. Pod obshchey redaktsiey A.D. Alekseeva. - Donetsk: IFGP NANU, 2006. – s. 196.

#### References

1. Donbass v shage ot ekologicheskoy katastrofy: vody zatoplennykh shakht mogut razrushit' doma, a khlor – unichtozhit' vse zhivoe [Elektronniy resurs] – Rezhim dostupu do resursu: <http://www.segodnya.ua/regions/donetsk/donbass-v-shage-ot-ekologicheskoy-katastrofy-vody-iz-zatoplennyh-shakht-mogut-razrushit-doma-a-hlor-unichtozhit-vse-zhivoe-625841.html>
2. Nikitchenko I.V., Prokopenko N.Yu. Vpliv viys'kovikh konfliktiv na navkolishne seredovishche ta ekologiyu. Materiali mizhnar.nauk.-tekhn. konf., 17-18 kvit. 2015 r., m. Severodonets'k. Ch. I / [ukl. : Tarasov V.Yu.]. – Severodonets'k : [Tekhnol. in-t Skhidnoukr. nats. un-tu im. V. Dalya (m. Severodonets'k)],s.153-156.
3. Nikitchenko I.V., Shvedchikova I.O.Ekologichni problemu u postrazhdalikh vid konfliktu rayonakh skhodu Ukraïni. Materiali mizhnarodnoï nauk.-tekhn. konf.2015 r., m. Kremenchuk.
4. Yarembasha I. F. Tekhnologiya zakrytiya (likvidatsii) ugol'nykh shakht / I. F. Yarembasha. – Donetsk: Nord-Press, 2004. – 238 s.
5. Matlak E. S. Snizhenie zagryaznennosti shakhtnykh vod v podzemnykh usloviyakh / E. S. Matlak, V. V. Maleev. – K: Tekhnika, 1991. – 136 s.
6. Zapol's'kiy A. K. Vodopostachannya, vodovidvedennya ta yakist' vodi / A. K. Zapol's'kiy. – K: Vishcha shk, 2005. – 671 s.
7. Vibir ta obgruntuvannya na osnovi ekspertnoï otsinki perspektivnikh napryamkiv tekhnologichnikh rishen' pid chas ekologichno bezpechnogo zakrityta vugil'nikh shakht / Geotekhnologii i upravlenie proizvodstvom KhKhI veka. Monografiya v 2 t., t.2., Donetsk.: DonNTU, 2006. – s.227-231.
8. Kulakov M. V. Tekhnologicheskie izmereniya i pribory dlya khimicheskikh proizvodstv / M. V. Kulakov. – Moskva, 1983.

#### Нікітченко І.В. Шведчикова І.О. Порівняльний аналіз методів потенційно небезпечних газів, що виділяються при затопленні шахт

*У статті показано, що найбільшу небезпеку для живих організмів представляють утворювачі при затопленні шахт газів: метан, окис вуглецю, вуглекислий газ, діоксид азоту, сірководень, діоксид сірки. Відзначено, що для реєстрації небезпечних газів, що виділяються при затопленні шахт, а також для визначення їх концентрацій існує досить велика кількість методів. Виконано порівняльний аналіз механічних, акустичних, теплових, магнітних, оптичних, іонізаційних, мас-спектрометричних, електрохімічних і напівпровідникових методів. Визначено вимоги, що пред'являються до методів контролю потенційно небезпечних газів. Встановлено, що найбільшою мірою зазначеним вимогам задовольняють акустичні, теплові, оптичні та електрохімічні методи контролю.*

**Ключові слова:** затоплення шахт, метод, газовий аналіз, контроль.

#### Nikitchenko I.V., Shvedchikova I.O. Comparative analysis of the methods for monitoring of potentially dangerous gases produced by flooded mines

*The article shows that the greatest danger to living organisms is formed by the mines flooding: methane, carbon monoxide, carbon dioxide, nitrogen dioxide, hydrogen sulfide, sulfur dioxide. It is noted that there is quite a number of methods for the registration of dangerous gases produced by the sinking of shafts, as well as to determine their concentrations. A comparative analysis of the mechanical, acoustic, thermal, magnetic, optical, ionization, mass spectrometry, electrochemical and semiconductor methods was made. The requirements imposed on the potentially hazardous gases methods of control were determined. It was established that the most specified requirements are satisfied acoustic, thermal, optical and electrochemical methods of control. These methods are most favorable for the use of the automated systems of closed mines.*

**Key words:** mine flooding, method, gas analysis, control.

**Нікітченко Інна Вікторівна** – асистент кафедри електромеханіки, метрології та приладів, факультету машинобудування та електричної інженерії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля.

**Шведчикова Ірина Олексіївна** – д.т.н., професор кафедри електромеханіки, метрології та приладів, факультету машинобудування та електричної інженерії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля.

*Рецензент: Марченко Д.М., д.т.н., проф.*

Стаття подана 10.11.2015

УДК 621.039

## К ВОПРОСУ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СТАНКОВ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Николаенко А.П.

## TO THE QUESTION OF MACHINE TOOLS REABILITY FORECASTING WITH THE METHODS OF MATHEMATICAL MODELING

Nikolaenko A.P.

*Проведен анализ существующих методов моделирования станков, в том числе CAD/CAM/CAE системы, представлена их классификация, рассмотрены принципы интегрированного использования САПР с целью обеспечения надежности на всех этапах жизненного цикла.*

**Ключевые слова:** математическое моделирование, жизненный цикл, CALS технологии, трехмерное моделирование, автоматизированное проектирование

Активное применение компьютерной техники позволяет прогнозировать выходные характеристики машин, их отдельных систем и узлов, начиная уже с самых ранних стадий проектирования, - с уровня принятия концепции. Это особенно актуально для дорогостоящих прецизионных машин, так как при их проектировании зачастую становится возможным существенно уменьшить или вообще исключить натурные исследования и испытания, требующие разработки и создания экспериментальных стендов и образцов. В результате снижаются затраты на доработку конструкции и технологии, на корректировку технической документации, сокращаются сроки внедрения проектируемых машин.

Прогнозирование качества и надежности станков является весьма сложной проблемой в силу ряда специфических особенностей станков. Во-первых, современный станок представляет собой совокупность систем с разными физическими принципами действия: механическая система, электрическая и электронная системы управления, гидравлическая, пневматическая и другие. Соответственно эти системы описываются совершенно различными моделями. Во-вторых, станок в процессе работы подвергается воздействию различных видов энергии: механической, тепловой, электромагнитной, химической, биологической и т.д. В-третьих, в системах станка под воздействием различных видов энергии возникают процессы

станка под воздействием различных видов энергии возникают процессы различной природы и различной скорости: колебательные, тепловые, износ, старение, коробление и другие, описываемые совершенно различными математическими моделями.

Решение многочисленных модельных задач в станкостроении невозможно без использования новых информационных технологий и современных программно-технических средств, позволяющих объединять процесс проектирования в единое информационное пространство, то есть так называемых ИПИ-технологии (или CALS-технологии - по зарубежной терминологии).

Эффективность применения этих технологий зависит от качества заложенных в них модельных представлений, описывающих предметные области всех фаз жизненного цикла создаваемого изделия. Особенностью модельных представлений проектно-конструкторской деятельности является семантическая увязка описаний различных предметных областей. В связи с тем, что деятельность проектной организации есть совокупность различных взаимосвязанных видов деятельности (функционирования, поддержания, развития), то возрастает значимость комплексного моделирования не только этих процессов, но и сопряженных с ними процессов управления. Вместе с тем, практика внедрения современных информационных технологий обусловлена объективными факторами, снижающими эффективность их применения для проектно-конструкторских организаций:

- многоаспектность используемых в процессе проектирования знаний, обусловленная необходимостью принятия решений, базирующихся на увязке в памяти специалистов-конструкторов информации обо всем жизненном цикле машиностроительных объектов;

- внедрение разнородных автоматизированных систем различного назначения (САПР, систем

организационного управления, управления качеством, управления ресурсами, электронного документооборота и др.), что затрудняет их интеграцию без предварительного моделирования деятельности проектно-конструкторской организации как единой сложной системы.

Построение пространственной геометрической модели изделия является центральной задачей компьютерного проектирования. Именно эта модель используется для дальнейшего решения задач формирования чертежно-конструкторской документации, проектирования средств технологического оснащения, разработки управляющих программ для станков с ЧПУ. Кроме того, эта модель передается в системы инженерного анализа (CAE-системы) и используется там для проведения инженерных расчетов. По компьютерной модели с помощью методов и средств быстрого прототипирования может быть получен физический образец изделия. 3D модель может быть не только построена средствами данной CAD-системы, но, в частном случае, принята из другой CAD-системы через один из согласованных интерфейсов, или сформирована по результатам обмера физического изделия-прототипа на координатно-измерительной машине (рис. 1).

Способы представления моделей. Различают поверхностное (каркасно-поверхностное) и твердотельное моделирование. При поверхностном моделировании сначала строится каркас - пространственная конструкция, состоящая из отрезков прямых, дуг окружностей и сплайнов. Каркас играет вспомогательную роль и служит основой для последующего построения поверхностей, которые «натягиваются» на элементы каркаса.

Созданные модели могут передаваться из одной CAD/CAM-системы в другую через специальные интерфейсы - согласованные форматы данных для обмена информацией.

Существует ряд так называемых стандартных интерфейсов. Они имеют формат символьных (ASCII) файлов, где описание геометрических и других характеристик модели выполняется в соответствии с принятым стандартом. На практике каждый формат имеет свои приоритетные области применения. Например, стандартный формат DXF используется в основном для передачи чертежно-графической информации; формат IGES - для передачи геометрии поверхностных моделей; формат STL - для передачи модели, аппроксимированной плоскими элементами, из CAD-системы в автономную CAM-систему, систему инженерного анализа (CAE-систему) или в установку для быстрого прототипирования изделий.

В последнее время все большее значение приобретает стандартный формат STEP, в котором, наряду с описанием геометрии модели, предусматривается описание других характеристик изделия. Существуют различные протоколы стандарта STEP, определяющие полноту состава передаваемой информации об изделии.

В ряде случаев CAD/CAM-системы могут «понимать» внутренние форматы друг друга, используемые для представления моделей. В этом случае говорят о наличии прямых интерфейсов между системами.

Одним из практических примеров использования интерфейсов является передача из конструкторского бюро на завод-изготовитель информации о спроектированном изделии (в электронном виде), в случае, когда конструкторское бюро и завод применяют в своей работе разные CAD/CAM-системы.

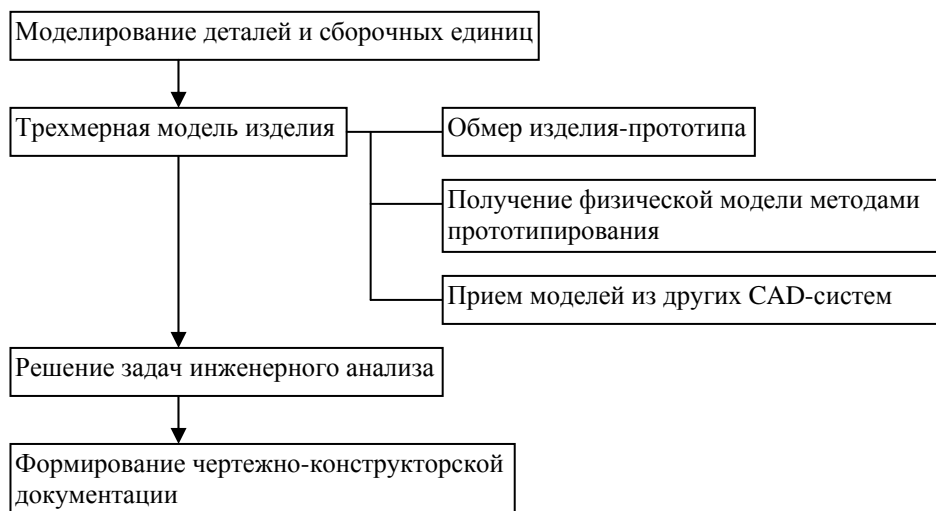


Рис. 1. Основные функции систем автоматизированного проектирования

Сегодня в мире предлагается большое число различных CAD-, CAM- и CAD/CAM-систем, отличающихся по функциональной мощности, области применения, степени сложности освоения системы пользователем, стоимости. Принято выделять три уровня CAD- или CAD/CAM-систем:

- CAD/CAM-системы, обеспечивающие решение задач проектирования и ТПП на наиболее высоком уровне автоматизации (high-end). Эти 3D-системы предназначены для работы на корпоративном уровне, ориентированы не на решение отдельных задач, а на связанные процессы, имеют развитый комплекс инженерных приложений, обеспечивают использование знаний. Представителями таких систем являются CATIA, Unigraphics и Pro/Engineer.

- CAD- или CAD/CAM-системы с менее высоким уровнем автоматизации процессов проектирования (middle-end), имеющие меньшее число инженерных приложений и некоторые ограничения. Тем не менее, эти системы обеспечивают полноценное пространственное моделирование изделий и получение чертежно-конструкторской документации (а для CAD/CAM-систем - разработку УП для оборудования с ЧПУ). Примерами таких систем являются Cimatron E, PowerShape/PowerMill, SolidWorks, КОМПАС 3D.

- CAD-системы с наименее высоким уровнем автоматизации. Это 2D системы для автоматизации чертежных работ или 3D системы с рядом существенных ограничений (по сложности создаваемых моделей, по числу деталей в сборке и др.). В качестве примера здесь можно привести систему КОМПАС-График.

Для создания и использования интегрированных подходов к автоматизированному проектированию необходимо в представлении модели включать не только геометрические данные. Так, модель изделия может быть представлена совокупностью следующих видов информации:

- объемное или не имеющее объема (представленное незамкнутыми поверхностями) тело как результат булевых операций над составляющими его формами;

- объемное или не имеющее объема тело как результат применения определенного метода его построения;

- аргументы построения тела в виде геометрических элементов;

- аргументы построения тела в виде совокупности логических и численных параметров;

- плоские параметрические эскизы с геометрическими отношениями между элементами;

- управляющие параметры;

- функции (отношения) между элементами;

- массивы значений для конкретных параметров;

- анализаторы, следящие за применением условных правил;

- контроллеры, приводящие в действие определенные функции на основе выполнения (невыполнения) условных правил;

- результаты абсолютного или относительного анализа, предназначенные для использования как аргументов в других функциях;

- ссылки и связи, привлекающие внешние или удаленные элементы (параметры) в качестве аргументов построения данной формы;

- методы, формализованные явным образом (пригодные для повторного применения) - «Power Core»;

- скрипты (программы), участвующие в работе методов как исполняемый программный код.

Все детали (и представляющие их геометрические формы) различаются по их принадлежности к конструктивно-технологическому классу. Эти классы обобщают в одну категорию все множество деталей, имеющих устойчивые конструктивные и технологические признаки. Их геометрическое определение, соответственно, может иметь свои термины, методы и аргументы построения, что не только способствует использованию информации об изделии на различных этапах его жизненного цикла, но и позволяет реализовать современный уровень автоматизации проектирования, не ограничивающийся решением задач моделирования и черчения, а предполагающий реализацию таких возможностей, как параллельное проектирование, накопление и использование корпоративных знаний, автоматическое проведение изменений по всем этапам процесса проектирования, многовариантная визуализация проекта.

Любой объект в описании изделия наделен негеометрическими характеристиками следующих категорий:

- графические атрибуты, представляющие объект средствами диалога системы;

- идентификация, определяющая систему именования, обозначения и представления продукта в служебной документации.

- физические свойства, определяющие механические и геометрические характеристики компонентов изделия - объем, площадь поверхности, координаты центра тяжести, ориентация векторов моментов инерции и другие. Физические свойства обычно происходят из результатов анализов;

- технологические свойства, определяющие производственные характеристики компонентов изделия - термообработка, покрытие, маркировка, клеймение, чистота поверхности, допуски и другие;

- административные свойства, определяющие характеристики объекта применительно к процессам его жизненного цикла - статус готовности, авторизация, сертификация и другие;

- функциональные свойства, характеризующие целевые параметры изделия - производительность, ресурс, удельная себестоимость эксплуатации и другие.

С другой стороны, автоматизация конструкторского проектирования лишь за счет построения 3D моделей и последующего получения чертежей также во многих случаях не приносит

должного эффекта в силу недостаточно высокого уровня автоматизации. Частичное улучшение дает разработка и использование специальных процедурных приложений к CAD-системе (например, конструирование пакета пресс-формы с использованием баз нормализованных деталей); существенно больший эффект может дать интегрированное использование набора процедурных приложений. Однако этот подход не может быть реализован для всех видов проектных процедур ТПП как в силу их большого числа, так и по причине слабой формализации и типизации многих проектных решений.

Подход к решению задач автоматизации проектирования за счет интегрированного использования 3D моделей и баз знаний способен привести одновременно и к гибкости создаваемой системы, и к существенному общему повышению уровня автоматизации. При этом - за счет формализации и хранения корпоративных знаний - для предприятия во многом решается проблема нехватки высококвалифицированных конструкторов и технологов.

Общая схема интегрированного использования 3D моделей и баз знаний сводится к некоторой проектной процедуре ТПП, реализуемой средствами прикладного программного интерфейса (API) CAD-системы и решающая конкретную задачу конструкторского или технологического проектирования с использованием базы корпоративных знаний.

Применение данной схемы позволяет строить прикладные САПР, работающие «от технического задания» и генерирующие все необходимые геометрические модели, чертежи, технологические процессы, текстовые или текстово-графические документы. Реализация каждой конкретной САПР требует определенных усилий, однако в результате достигаются высокий уровень автоматизации проектных решений и гибкость системы.

#### Литература

1. Н.В. Батин. Основы информационных технологий. – Минск: Нац. акад. н. аук. Беларуси, 2008. – 235 с.
2. Ли К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE). – СПб.: Питер, 2004. – 506 с.

#### References

1. N.V. Batin. *Osnovy informacionnyh tehnologij*. – Minsk: Nac. akad. n auk. Belarusi, 2008. – 235 s.
2. Li K. *Osnovy SAPR (CAD/CAM/CAE)*. – SPb.: Piter, 2004. – 506 s.

#### Ніколаєнко А.П. До питання забезпечення надійності верстатів методами математичного моделювання

*Проведен аналіз існуючих методів моделювання верстатів, в тому числі CAD/CAM/CAE системи, представлена їх класифікація, розглянуті принципи інтегрованого використання САПР з метою забезпечення надійності на всіх етапах життєвого циклу.*

**Ключові слова:** математичне моделювання, життєвий цикл, CALS технології, тримірне моделювання, автоматизоване проектування.

#### Nikolaenko A.P. To the question of machine tools reliability forecasting with the methods of mathematical modeling

*The analysis of the existing methods of machine tools modeling, including CAD/CAM/CAE systems is done, their classification is presented, principles of the unified using of SAPR with the purpose of maintenance of reliability on the all stages of life cycle.*

*Prediction of the quality and reliability of machines is a very complex problem due to a number of specific features of the machines. Active use of computer technics allows to predict the output characteristics of vehicles, their individual systems and components, starting from the early design phase, the level of acceptance of the concept. This is especially true for expensive precision machines, since their design often becomes possible to substantially reduce or eliminate full-scale research and testing, requiring development and production of experimental stands and images. As a result of lower costs for finalizing design and technology, updating technical documentation, reduced time of implementation of the designed machines.*

**Key words:** mathematical modeling, life cycle, CALS technologies, 3D modeling.

**Николаєнко А.П.** – к.т.н., доцент, доцент кафедри машинобудування, верстатів та інструментів Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля

*Рецензент: Носко П.Л., д.т.н., проф.*

УДК 621.08.45

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ, ЩО ВИНИКАЮТЬ У КОНТЕЙНЕРІ ВІБРАЦІЙНОГО ВЕРСТАТА

Николаенко А.П.

## MATHEMATICAL MODELING OF PROCESSES OCCURRING IN THE CONTAINER OF THE VIBRATING MACHINE

Nikolaenko A.P.

*В работе представлено математическое моделирование движения U-образного контейнера вибрационного станка, с целью нахождения оптимального положения вибровозбудителя относительно контейнера и предложена усовершенствованная конструкция станка.*

**Ключевые слова:** *вибрационная обработка, циркуляционное движение, вибрационный станок, оптимальная конструкция, производительность.*

Вібраційна обробка (Віо), що одержала широке поширення і є перспективним методом обробки деталей, особливо складних форм, виконується на вібраційному обладнанні різних типів.

За час існування вібраційної обробки неодноразово проводилися аналіз і класифікація вібраційного обладнання, з метою знаходження раціональної конструкції Віо-верстата, що забезпечує інтенсифікацію процесу обробки та підвищення якості оброблюваних поверхонь. [1, 3, 4, 5, 6].

Метою роботи є моделювання взаємозв'язок між параметрами вібраційного обладнання, його конструктивними елементами і відповідними характеристиками технологічних процесів. А також розробка, на основі проведених досліджень, вдосконаленої конструкції вібраційного верстата, що забезпечує підвищення продуктивності вібраційної обробки.

### Математическое моделирование

Математичне моделювання процесу вібраційної обробки є досить складним завданням. В першу чергу це пов'язано з тим, що робоча середовище є сипучою середовищем, характеристики якої значно змінюються в залежності не тільки від властивостей її елементів, але і від режимів роботи і параметрів конструкції вібраційного верстата. Змінюються такі властивості, як здатність середовища передавати силовий імпульс в зону обробки, транспортування робочого середовища, поява в контейнері зон з різною інтенсивністю обробки.

Моделювання руху контейнера є необхідною сполучною ланкою між параметрами роботи і конструкції вібраційного верстата і кінцевим результатом – енергією силового імпульсу, що передається від стінок контейнера робочої середовищі і далі в зону обробки, зняттям припуску або глибиною зміцнення поверхневого шару заготовки в залежності від поставленої мети.

Опис руху контейнера з урахуванням його завантаження є актуальною задачею також з причини, що лише в цьому випадку можливо проводити подальший аналіз переміщення робочої середовища.

Була розроблена математична модель [2] руху контейнера вібраційного верстата, що враховує вплив маси завантаження і зміна реологічних параметрів коливальної системи, розрахункова схема якої представлена на рис. 1.

Для вирішення таких задач використовували рівняння Лагранжа другого роду:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial T}{\partial q} + \frac{\partial U}{\partial q} = F_q, \quad (1)$$

де  $q$  – узагальнена координата ( $q \in \{X, Y, \varphi\}$ );  $T$  – кінетична енергія системи;  $U$  – потенційна енергія системи;  $F_q$  – зовнішня узагальнена сила, для розглянутої моделі визначається як:

$$F_q = Q_q - \frac{\partial D}{\partial \dot{q}}, \quad (2)$$

де  $Q_q$  – сила, що збудує;  $D$  – дисипативна функція Релея, що виражає потужність дисипативних сил поверхневого тертя:

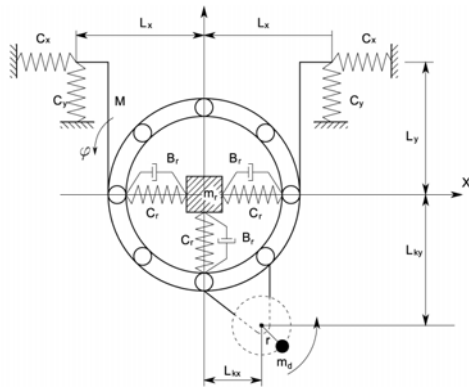


Рис. 1. Розрахункова схема запропонованої математичної моделі роботи вібраційного верстата:  
де  $C_x, C_y$  – коефіцієнт пружності підвісків;  
 $L_x, L_y$  – відстані по осях X, Y від центра мас до точок закріплення лівого і правого підвіски;  
 $C_r$  – коефіцієнт пружності робочого середовища;  
 $B_r$  – коефіцієнт демпфування робочого середовища;  
 $L_{kx}, L_{ky}$  – відстані по осях X, Y від центра мас до точки придання збурюючої сили;  
 $M$  – маса контейнера і приєднаної частини завантаження;  
 $m_r$  – маса завантаження (згідно зі схемою розташована в центрі контейнера і така, що переміщується під впливом шару, дотичного з його стінками);  
 $m_d$  – незбалансована маса дебалансних вантажів;  
 $J$  – момент інерції системи (сукупний контейнера і дебаланса) щодо центра мас;  
 $r$  – ексцентриситет маси дебаланса щодо його осі обертання;  
 $\omega$  – кутова швидкість обертання дебалансного вала віброзбуджувача;  
 $\varphi$  – кут повороту контейнера щодо центра мас системи проти годинникової стрілки.

$$D = \frac{1}{2} \int \dot{q}^T B \dot{q} dF, \quad (3)$$

де  $\dot{q}$  – стовпець узагальнених відносних швидкостей поверхонь тертя;  
 $B$  – не негативна матриця коефіцієнтів грузлого тертя, а інтегрування відбувається по всіх поверхнях тертя  $F$ .

Для цієї розрахункової схеми й відповідних узагальнених координат  $D$  запишеться як:

$$D = \frac{1}{2} \left[ B_r (\dot{x}_r - \dot{x})^2 + B_r (\dot{y}_r + \dot{y})^2 \right]. \quad (4)$$

А кінетична енергія системи може бути виражена як:

$$T = \frac{1}{2} \left( (M + m_k) \dot{x}^2 + (M + m_k) \dot{y}^2 + J \dot{\varphi}^2 + m_r \dot{x}_r^2 + m_r \dot{y}_r^2 \right). \quad (5)$$

Потенційна енергія виражається як сума енергій деформації пружних елементів системи по відповідних узагальнених координатах і енергії, що

пов'язана із пружними властивостями робочого середовища:

$$U = \frac{1}{2} \left[ 2C_x (x - L_x \varphi)^2 + C_y (y - L_x \varphi)^2 + C_y (y + L_x \varphi)^2 + C_r (x_{cr} - x)^2 + C_r (y_{cr} - y)^2 \right]. \quad (6)$$

Прикладена сила  $Q_q$  для відповідних узагальнених координат визначається як:

$$Q_x = m_k r \omega^2 \cos(\omega t);$$

$$Q_y = m_k r \omega^2 \sin(\omega t); \quad Q_\varphi = m_k r \omega^2 (L_x \sin(\omega t) - L_y \cos(\omega t)) \quad (7)$$

Підставивши  $D$ ,  $T$ ,  $U$  у рівняння (1) і розписавши для відповідних узагальнених координат, отримуємо систему з п'яти звичайних лінійних диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} (M + m_d) \ddot{x} + (2C_x + C_r) \dot{x} - 2C_x L_y \dot{\varphi} - C_r x_r + B_r \dot{x} - B_r \dot{x}_r = \omega^2 r \cos(\omega t) m_d, \\ (M + m_d) \ddot{y} + (2C_y + C_r) \dot{y} - C_r y_r + B_r \dot{y} - B_r \dot{y}_r = \omega^2 r \sin(\omega t) m_d, \\ J \ddot{\varphi} + (2C_x L_y^2 + 2C_y L_x^2) \dot{\varphi} - 2C_x L_y x = L_{kx} (\omega^2 r \sin(\omega t) m_d) - L_{ky} (\omega^2 r \cos(\omega t) m_d), \\ m_r \ddot{x}_r + C_r x_r - C_r x + B_r \dot{x}_r - B_r \dot{x} = 0, \\ m_r \ddot{y}_r + C_r y_r - C_r y + B_r \dot{y}_r - B_r \dot{y} = 0. \end{cases} \quad (8)$$

Система (8) була розв'язана чисельно за допомогою модифікованого методу Рунге-Кутта, що дозволило досягти наступних основних цілей:

- дослідити залежність траєкторії руху контейнера вібраційного верстата від розташування віброзбудника;
- оцінити циркуляційний рух маси завантаження;
- дослідити залежність продуктивності процесу вібраційної обробки від розташування віброзбудника щодо корпусу U-подібного контейнера.

Запропонована модель дозволяє обчислювати траєкторії руху контейнера, а також потужність, що витрачається на обробку виробів в залежності від умов обробки і положення віброзбудника щодо контейнера вібраційного верстата.

Спираючись на розроблену модель, запропонована методика точного визначення циркуляційної швидкості робочого середовища, а також методика визначення стабільності руху циркуляційного потоку. Отримані результати досліджень залежності циркуляційного руху від місця розташування віброзбудника.

За допомогою розробленої моделі визначено ефективність процесу вібраційної обробки в залежності від координат розташування віброзбудника щодо поздовжньої осі контейнера, з забезпеченням циркуляційного потоку і підвищенням продуктивності процесу без введення додаткових енерговитрат.

Експериментальні дослідження підтвердили результати математичного моделювання показали, що зміни в конструкції вібраційного верстата, вибір місця розташування віброзбудника відносно контейнера, а саме його розташування під кутом 45° до осі ординат, перпендикулярній, поздовжньої осі,

що проходить через центр мас контейнера для верстата з об'ємом контейнера до 100 дм<sup>3</sup> забезпечує підвищення продуктивності вібраційної обробки на 20...30 % при досягненні необхідних технологічних результатів.

На основі проведених досліджень була розроблена конструкція модифікованого вібраційного верстата ВНУ 100, з можливістю зміни місця розташування віброзбудника щодо контейнера (рис. 2) призначеного для виконання наступних операцій: очищення поверхні деталі від окалини, корозії, формувальних матеріалів; видалення задирок і округлення гострих кромки, видалення облоя; шліфування і полірування поверхонь деталей при підготовці їх під захисні і декоративні гальванічні та ін. покриття; підвищення якості поверхневого шару, забезпечення необхідних геометричних і фізико-механічних характеристик.

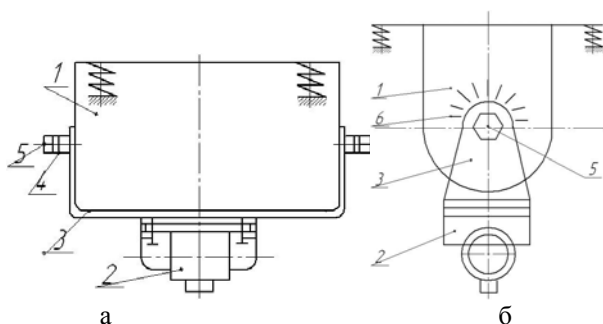


Рис. 2. Принципова схема модифікованого вібраційного верстата ВНУ-100: а – загальний вид; б – вид збоку

Відмінність даного верстата полягає в забезпеченні можливості зміни розташування джерела коливальних – віброзбудника щодо контейнера. Це досягається шляхом закріплення віброзбудника жорстко на скобі, з можливістю зміни положення щодо контейнера і подальшого закріплення до нього.

Верстат для вібраційної обробки деталей містить U-подібний контейнер 1, віброзбудника 2, жорстко закріпленій на скобі 3, прикріпленою до контейнера з допомогою шайби 4 і болта 5, з можливістю зміни положення скоби відносно контейнера, що визначається за шкалою 6 і наступним прикріпленням до нього болтами 7.

Технічна характеристика верстата ВНУ-100: об'єм контейнера  $V = 100 \text{ дм}^3$ ; амплітуда коливальних  $A = 0,2 \dots 3,2 \text{ мм}$ ; частота коливальних  $f = 50 \text{ Гц}$ ; потужність  $N = 7,0 \text{ кВт}$ ; маса  $m = 2400 \text{ кг}$ ; габарити –  $2100 \times 950 \times 1200 \text{ мм}$ .

Робота верстата для вібраційної обробки деталей здійснюється наступним чином. Контейнер 1, змонтований на пружних підвісках і має можливість коливатися в різних напрямках, повідомляються коливальні рухи за допомогою інерційного віброзбудника 2. Віброзбудник 2 встановлюється під певним кутом по відношенню до контейнера 1, визначається за шкалою 6. В залежності від кута повороту скоби 3, на якій

жорстко закріплений віброзбудник, встановлюється його положення, що забезпечує стабільне циркуляційний рух, який сприяє досягненню якісного результату процесу обробки. При цьому рух валу віброзбудника здійснюється в бік, протилежний напрямку руху робочого середовища.

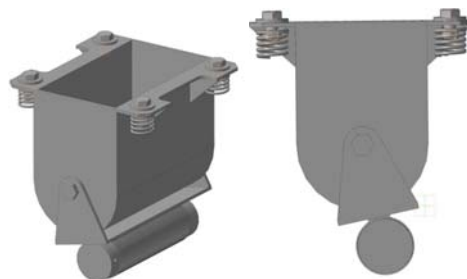


Рис. 3. Тривимірний модель вібраційного верстата модифікованої конструкції, розроблена в середовищі САПР Компас 3D

Вибір розташування віброзбудника здійснювався наступним чином (рис. 4). На підставі раніше проведених досліджень були встановлені початкові параметри, а саме частота і амплітуда, завантажувалася робоче середовище і заданий об'єм технологічної рідини. Потім були встановлені початкові координати розташування віброзбудника. Після запуску верстата здійснювалося вимірювання циркуляційної швидкості потоку робочого середовища, і, якщо її значення відповідало необхідному, вироблялася завантаження деталей. Здійснювалось повторне вимірювання циркуляційної швидкості робочого середовища і завантажені в контейнер деталі, якщо це значення близько до першого, то обробка проводилася при даному положенні віброзбудника. Таким чином, переміщаючи скобу з розташуванням на ній віброзбудником відносно контейнера, орієнтуючись по шкалі і вимірюючи циркуляційну швидкість маси завантаження, можна вибрати найбільш оптимальне місце розташування віброзбудника.

Внаслідок вібрацій деталі і робоче середовище безперервно мають змінні за знаком прискорення і знаходяться в інерційному відносному переміщенні, здійснюючи два види руху: коливальний (осцилюючий) з частотою, що залежить від частоти коливальних контейнера і обертання всієї маси завантаження (циркуляційний).

Напрямок відносних переміщень деталей і частинок робочого середовища змінюється, в результаті чого відбувається обробка. В процесі обробки деталі займають різні положення в робочому середовищі, що забезпечує досить рівномірну обробку всіх поверхонь, що контактують з робочим середовищем.

Завдяки можливості забезпечення раціонального розташування віброзбудника відносно контейнера підвищується продуктивність процесу вібраційної обробки, знижується час, необхідний для обробки виробів без підвищення енергоємності процесу.

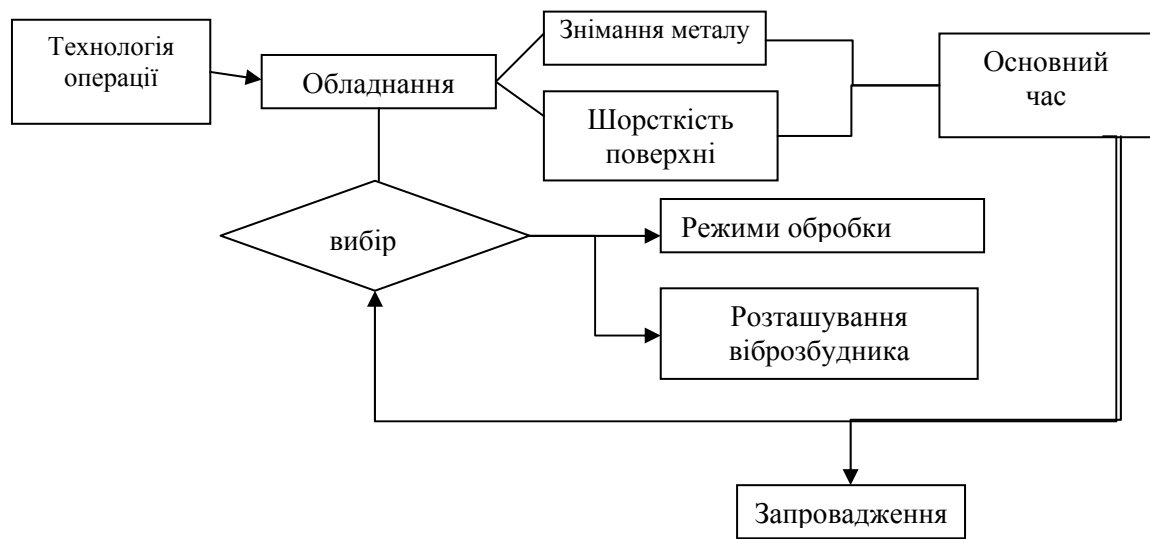


Рис. 4. Схема вибору обладнання для операції вібраційної обробки

### Литература

1. Вибрационные станки для обработки деталей / Бабичев А.П., Трунин В.Б., Самодумский Ю.М., Устинов В.П. – М.: Машиностроение, 1984. – 168 с.
2. Николаенко А.П. Исследование зависимости интенсивности вибрационной обработки от расположения вибровозбудителя / А.П. Николаенко, М. А. Калмыков // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2009. – № 2/5(38). – С. 54 – 57.
3. Погребщиков Ю.Б. Выбор технологического оборудования для реализации многооперационных технологических процессов вибрационной обработки / Ю. Б. Погребщиков, В.Б. Трунин, Ю.М. Самодумский, В.Г. Кравчик// Вопросы вибрационной технологии. – 1999. – С. 11 – 19.
4. Сердюк Л.И. Управляемые вибрационные машины с дебалансными вибровозбудителями колебаний / Л.И. Сердюк// Вибрации в технике и технологиях. – 1994. – №1. – С. 31 – 35.
5. Берник П.С. Анализ конструкций вибрационных частотных машин для оздоблювально-зміцнювальної обробки деталей / П.С. Берник, Л. В. Ярошенко, Р.М. Горбатюк // Вибрации в технике и технологиях. – 2000. – №2(14). – С. 7 – 14.
6. Берник П.С. Развитие конструктивных та технологичних схем машин для обробки виробів в умовах вільного кінематичного зв'язку між деталями та робочим інструментом / П.С. Берник, І. П. Паламарчук, І.С. Липовий // Вібратиї в техніці та технологіях. – 1998. - №2 (6). – С. 21 – 29.

### References

1. Vibracionnye stanki dlja obrabotki detalей / Babichev A.P., Trunin V.B., Samodumskij Ju.M., Ustinov V.P. – M.: Mashinostroenie, 1984. – 168 s.
2. Nikolaenko A.P. Issledovanie zavisimosti intensivnosti vibracionnoj obrabotki ot raspolozhenija vibrovobuditelja / A.P. Nikolaenko, M. A. Kalmykov // Vostochno-Evropeskij zhurnalпередовых технологий. – 2009. – № 2/5(38). – S. 54 – 57.
3. Pogrebshhikov Ju.B. Vychor tehnologicheskogo oborudovanija dlja realizacii mnogooperacionnyh tehnologicheskikh processov vibracionnoj obrabotki / Ju. B.

- Pogrebshhikov, V.B. Trunin, Ju.M. Samodumskij, V.G. Kravchik// Voprosy vibracionnoj tehnologii. – 1999. – S. 11 – 19.
4. Serdjuk L.I. Upravljaemye vibracionnye mashiny s debalansnymi vibrovobuditeljami kolebanij / L.I. Serdjuk// Vibracii v tehnike i tehnologijah. – 1994. – №1. – S. 31 – 35.
5. Bernik P.S. Analiz konstrukcij vibracijnih tehnologichnih chastotnih mashin dlja ozdobljuval'no-zmicnjuval'noi obrobki detalей / P.S. Bernik, L. V. Jaroshenko, R.M. Gorbatjuk // Vibracii v tehnike i tehnologijah. – 2000. – №2(14). – S. 7 – 14.
6. Bernik P.S. Rozvitok konstruktivnih ta tehnologichnih shem mashin dlja obrobki vibroviv v umovah vil'nogo kinematchnogo zv'jazku mizh detaljami ta robochim instrumentom / P.S. Bernik, I. P. Palamarchuk, I.S. Lipovij // Vibracii v tehnici ta tehnologijah. – 1998. - №2 (6). – S. 21 – 29.

### Ніколаєнко А.П. Вдосконалення конструкції вібраційних верстатів з U-подібною формою контейнера

В роботі представлено математичне моделювання руху U-подібного контейнера вібраційного верстата, з метою знаходження оптимального положення віброзбудника відносно контейнера та запропонована удосконалена конструкція верстата.

**Ключові слова:** вібраційна обробка, циркуляційний рух, вібраційний верстат, оптимальна конструкція, продуктивність.

### Nikolaenko A.P. Mathematical modeling of processes occurring in the container of the vibrating machine

The work presents the mathematical modeling of the motion of the vibrating machine U-shaped container, in order to find the optimum position of vibroexciter relatively to the container and an improved design of the machine.

There has been investigated the interconnection between the design features of the vibrating machine and the power impuls sent in the processing zone, technological result of the said processing, metal removal and the depth of strengthening. We have specified the conditions of the stable

*circular movement origin, speed rise and useful capacity applied for processing operation.*

*It has been proved that the proposed solutions about the location of the oscillation source contribute the increase of vibrating processing of parts in different finishing, smoothing and strengthening operations.*

**Key words:** *vibrating treatment, circular motion, vibrating machine, optimal design, productivity.*

**Николаенко А.П.** – к.т.н., доцент, доцент кафедри машинобудування, верстатів та інструментів Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля.

*Рецензент:* **Соколов В.І.**, д.т.н., професор

Стаття подана 10.11.2015.

УДК 621.002.5 : 62-83.001.6

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ОБЪЕМНОГО ГИДРОПРИВОДА

Рассказова Ю.Б.

## EXPERIMENTAL STUDIES OF THE EFFECTIVENESS OF REGULATING OF VOLUME HYDRAULIC DRIVE

Rasskazova Yu.B.

*Представлен экспериментальный стенд и методика исследования эффективности способов регулирования выходного звена объемного гидропривода машиностроительного оборудования. Показано преимущество регулирования скорости изменением рабочего объема насоса.*

**Ключевые слова:** *машиностроительное оборудование, объемный гидропривод, объемный способ регулирования, дроссельный способ регулирования*

### Постановка проблемы

Современные ресурсосберегающие технологии в производстве и обработке материалов давлением в машиностроении предъявляют всевозрастающие требования к техническим и функциональным характеристикам технологического оборудования. Качество изделий при механической обработке во многом зависит от возможностей реализации оптимальных законов движения рабочих органов и заданных скоростей деформации в условиях переменной нагрузки. В этой связи важным является повышение точности и расширение функциональных возможностей приводов машиностроительного оборудования.

Достижение произвольной кинематики рабочих органов, возможность программной реализации оптимальных законов движения обеспечивается применением автоматических электрогидравлических приводов [1, 2]. В тоже время, уровень энергоэффективности современного машиностроительного оборудования не всегда отвечает требованиям ресурсосберегающих технологий. КПД автоматических электрогидравлических приводов энергоемкого оборудования (до 200 кВт), которое выпускается или используется отечественной промышленностью, остается низким, в ряде случаев не превышает 20-30%. Существует определенный резерв повышения эффективности приводов, а именно, их экономичности, функциональных возможностей, точности, в частности, уменьшения потребляемой

мощности за счет сокращения затрат энергии, связанных с процессом регулирования. Поэтому, актуальными являются исследования характеристик рабочих процессов при регулировании выходных параметров автоматических электрогидравлических приводов машиностроительного оборудования, влияния способов и методов регулирования на эффективность приводов.

### Анализ последних исследований и публикаций

Анализ основных способов регулирования скорости выходных звеньев объемных гидравлических приводов достаточно широко представлен в литературе [1 - 5]. Аналитические методы оценки показателей и характеристик процессов регулирования не получили широкого распространения в силу их сложности. Ввиду необходимости принятия существенных упрощений и допущений результаты расчетов являются приближенными и имеют значительную погрешность. Кроме того, полученные аналитически математические зависимости требуют проверки адекватности, которая может быть выполнена только на основе экспериментальных исследований.

Так как экспериментальные методы относительно просты и позволяют сравнительно быстро получить характеристики исследуемого объекта, они получили широкое распространение при оценке показателей эффективности автоматических электрогидравлических приводов [3, 4].

### Цель статьи

Целью работы является проведение экспериментальных исследований показателей и характеристик процессов регулирования скорости вращательного движения выходного звена объемного гидропривода машиностроительного оборудования, оценка эффективности способов регулирования скорости выходного звена.

**Материалы и результаты исследования**

Исследования показателей и характеристик процессов регулирования скорости вращательного движения выходного звена объемного гидропривода проводились на экспериментальном стенде, гидравлическая схема которого показана на рис. 1.

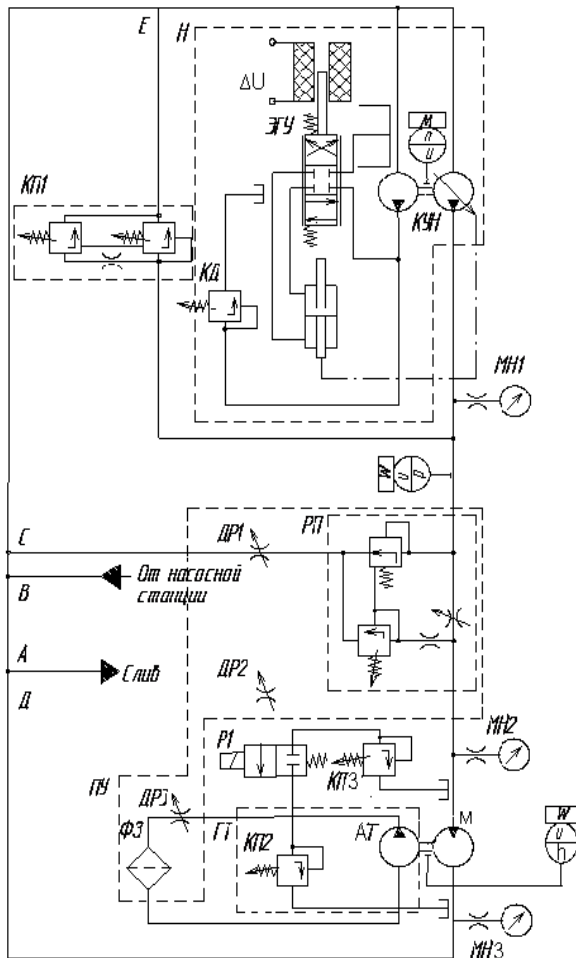


Рис.1. Гидравлическая схема экспериментального стенда

Экспериментальный стенд состоит из следующих узлов:

1. Насосная установка, включающая насос НАС, приводной электродвигатель, датчик частоты вращения, предохранительный клапан КП1 и динамометр.
2. Установка гидромотора М и гидротормоза ГТ с датчиком частоты вращения и динамометром.
3. Пульт управления ПУ, на котором установлены дроссели ДР1, ДР2, ДР3, регулятор потока РП, фильтр Ф3, манометры МН1, МН2, МН3, панели датчиков частот вращения и импульсов электросети и др.
4. Вспомогательная насосная станция типа Г48-32.
5. Система трубопроводов.
6. Система электропитания и управления.

Стенд имеет два гидравлических контура: контур испытуемого гидропривода с замкнутой циркуляцией жидкости и контур гидротормоза с разомкнутой циркуляцией жидкости.

Основной контур включает: насос НАС (типа НАС 0,04/20 с наибольшим рабочим объемом 0,04 л), гидромотор М (типа ПМ № 2,5 А с рабочим объемом 0,0317 л), дроссели ДР1 и ДР2 (типа Г77-1), регулятор потока РП (типа Г55-1), предохранительный клапан КП1 (типа Г52-1) и систему трубопроводов, связывающие эти узлы.

Установленный на стенде регулируемый аксиально-поршневой насос НАС включает: качающий узел насоса КУН, электрогидравлический усилитель (ЭГУ) 4WRE6 серия 10, вспомогательный пластинчатый насос НП для питания ЭГУ, клапан давления КД вспомогательного насоса.

При перемещении золотника ЭГУ в любое положение в пределах его хода поршень гидроцилиндра отслеживает это перемещение и изменяет положение регулирующего органа (шайбы) качающего узла насоса КУН, а значит, рабочий объем насоса, т.е. его подачу.

Частота вращения вала насоса гидромотора М может регулироваться:

1. Объемным способом – изменением положения регулирующего органа (шайбы) насоса НАС, а следовательно, его подачи с помощью ЭГУ.
2. Дроссельным способом – с помощью дросселя ДР2, установленного параллельно гидромотору М; дросселя на входе в гидромотор М (используется дроссель регулятора потока РП).

При объемном способе регулирования частоты вращения вала гидромотора М жидкость от качающего узла насоса КУН поступает в гидромотор М и далее проходит по системе низкого давления на вход качающего узла насоса КУН. Дроссели ДР1 и ДР2 должны быть закрыты, а дроссель регулятора потока РП полностью открыт, что исключает дополнительные объемные и гидравлические потери в гидроприводе.

При дроссельном способе регулирования жидкость от качающего узла насоса КУН идет через гидромотор М и переливается параллельно через дроссель ДР2 или золотник регулятора потока РП и дроссель ДР1, или предохранительный клапан КП1, в зависимости от режима испытаний (соответственно при регулировании дросселем ДР2, регулятором потока РП или дросселем регулятора РП как простым дросселем, установленным последовательно с гидромотором М). Далее потоки суммируются в узлах Д, С и Е.

Для питания основного контура охлажденной профильтрованной рабочей жидкостью служила вспомогательная насосная станция Г-48-32, не показанная на гидравлической схеме экспериментального стенда. Из основной магистрали (узел А) часть рабочей жидкости идет на слив, а по напорному трубопроводу вспомогательной насосной станции в узел В

основной магистрали подается отфильтрованная и охлажденная жидкость взамен жидкости, сливаемой из узла А, и утечек. Давление в основной системе на входе насоса НАС настраивалось предохранительным клапаном вспомогательной насосной станции.

Вал гидромотора М нагружался гидротормозом ГТ (гидромашинной типа ПМ № 5, работающей в режиме насоса). В контуре гидротормоза имелся дроссель ДР3 (типа Г77-1) для регулирования нагрузки, фильтр Ф3 (типа Г41), предохранительный клапан КП2 и бак БТ.

Для определения крутящих моментов при статических испытаниях на входе и выходе гидропривода (на валу насоса и мотора) статоры электродвигателя и гидротормоза были установлены в парах качения и удерживались от поворота рычагами, соединенными с динамометрами. По показаниям динамометров можно было рассчитывать указанные моменты. Кроме того, на стенде предусматривалась возможность измерения манометрами МН1, МН2, МН3 давлений на входе насоса НАС, входе и выходе гидромотора М, а также ртутным термометром температуры рабочей жидкости на входе в насос.

Состав контрольно-измерительной и регистрирующей аппаратуры определялся теми параметрами, которые необходимо было измерять для расчета статических и динамических характеристик отдельных элементов и гидравлического привода в целом.

При статических испытаниях измерялись:

$\omega_n$ ,  $\omega$  – частота вращения валов насоса и мотора;

$M_n$ ,  $M_m$  – крутящий момент на валу насоса и мотора;

$P_n$ ,  $P_c$  – давления в линиях нагнетания и слива.

Частота вращения валов измерялась счетчиками импульсов типа СБ-1М/100 от электрической сети и датчика, установленного на валу машин. Погрешность определения частоты вращения при этом не превышала 2 %.

Как указывалось выше, крутящий момент на валу гидротормоза и насоса определялся с помощью динамометров

$$M = F_0 l, \quad (1)$$

где  $F_0$  – показания динамометра;  $l$  – плечо рычага.

На стенде использованы динамометры марки ДПУ-0.02-2, что обеспечило погрешность измерения момента с погрешностью не более 2 %.

Давления в системе измерялись манометрами типа МН класса точности 0,5, подключенными к трубопроводу через демпферы.

Определение эффективности объемного способа регулирования скорости выходного звена гидравлического привода осуществлялось

следующим образом. На экспериментальном стенде (рис. 1) закрывались дроссели ДР2 и ДР3 и полностью открывался дроссель регулятора потока. Производительность насоса регулировалась электрическим сигналом, подаваемым на ЭГУ.

Потребляемую мощность гидравлического привода находили по измеренным значениям момента на валу насоса  $M_n$  и частоты вращения насоса  $\omega_n$

$$N_n = M_n \omega_n. \quad (2)$$

Полезную мощность рассчитывали по значениям момента на валу гидромотора  $M_m$  и частоты вращения вала гидромотора  $\omega$

$$N_m = M_m \omega. \quad (3)$$

КПД гидравлической части привода определяли как

$$\eta = \frac{N_m}{N_n}. \quad (4)$$

В процессе экспериментов контролировался уровень давления в нагнетательной и сливной магистралях манометрами МН1 и МН2. Процедура повторялась при различных нагрузках, которые устанавливались дросселем гидротормоза ДР3. Каждый опыт повторялся несколько раз, причем последовательность их была рандомизирована, чтобы избежать влияния неучтенных факторов.

Исследование эффективности дроссельных способов регулирования (с дросселем на входе и параллельно двигателю) выполнялось следующим образом. В первом случае дроссели ДР3 и ДР2 были закрыты и изменение частоты вращения гидродвигателя осуществлялось дросселем регулятора потока. Во втором случае дроссель регулятора потока был полностью открыт, а регулирование осуществлялось дросселем ДР2 при полностью закрытом ДР1. Опыты выполнялись при постоянной (максимальной) производительности насоса. Изменялись те же параметры и определялись зависимости (4) от безразмерной частоты вращения вала гидромотора (т.е. от глубины регулирования)

$$\bar{\omega} = \omega / \omega_{\max}, \quad (5)$$

где  $\omega_{\max}$  – максимальная частота вращения.

Методика обработки опытных данных при проведении экспериментальных исследований достаточно полно изложена в литературе [6 – 9].

На рис. 2 показаны зависимости КПД от безразмерной частоты вращения при объемном (1) и дроссельном (2) способах регулирования. При дроссельном регулировании рассматривался случай установки дросселя на входе гидромотора. Анализ приведенных зависимостей показывает преимущество регулирования скорости изменением рабочего объема насоса.

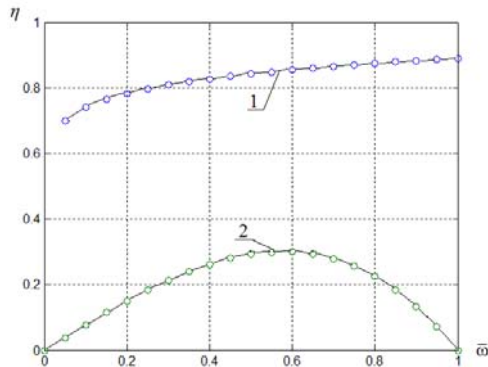


Рис. 2. Зависимость КПД привода от глубины регулирования

### Выводы

Представлен стенд для проведения экспериментальных исследований эффективности способов регулирования скорости вращательного движения выходного звена объемного гидропривода, рассмотрена методика экспериментальных исследований и обработки опытных данных. Сравнением экспериментальных зависимостей КПД от глубины регулирования показано преимущество регулирования скорости изменением рабочего объема насоса.

### Литература

1. Андрийчук Н.Д. Гидравлика и гидропневмоприводы / Н.Д. Андрийчук, А.В. Вялых, А.А. Коваленко, Я.И. Мальцев, В.И. Ремень, В.И. Соколов. – Луганск: ВНУ им. В. Даля, 2008. – 320 с.
2. Федорец В.А. Гидроприводы и гидропневмоавтоматика станков / В.А. Федорец, М.Н. Педченко, А.Ф. Пичко, Ю.В. Пересадько, В.С. Лысенко. – К.: Вища шк., 1987. – 375 с.
3. Навроцкий К.Л. Теория и проектирование гидро- и пневмоприводов. – М.: Машиностроение, 1991. – 384 с.
4. Попов Д.Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем. – М.: Машиностроение, 1987. – 464 с.
5. Соколов В.И. Моделирование силовой части автоматического электрогидравлического привода с объемным регулированием / В.И. Соколов, Н.Г. Азаренко, Я.В. Соколова // Вісн. Східноукр. націон. ун-ту ім. В. Даля. – 2012. - № 12 (183). - Ч.1. – С. 260 - 270.
6. Коваленко А.О. Основи наукових досліджень (планування експериментів) / А.О. Коваленко, А.С. Роговий, Д.О. Сьомін. – Луганськ: СХУ ім. В. Даля, 2011. – 216 с.
7. Джонсон Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: Методы планирования эксперимента / Н. Джонсон, Ф. Лион. – М.: Мир, 1981. – 520 с.

8. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1971. – 274 с.
9. Лудченко А.А. Основы научных исследований / А.А. Лудченко, Я.А. Лудченко, Т.А. Примак. – К.: Знання, 2000. – 114 с.

### References

1. Andrijchuk N.D. Gidravlika i gidropnevmoприводы / N.D. Andrijchuk, A.V. Vjalyh, A.A. Kovalenko, Ja.I. Mal'cev, V.I. Remen', V.I. Sokolov. – Lugansk: VNU im. V. Dalja, 2008. – 320 s.
2. Fedorec V.A. Gidroприводы i gidropnevmoавтоматика станков / V.A. Fedorec, M.N. Pedchenko, A.F. Pichko, Ju.V. Peresad'ko, V.S. Lysenko. – K.: Vishha shk., 1987. – 375 s.
3. Navrockij K.L. Teorija i proektirovanie gidro- i pnevmoприводов. – M.: Mashinostroenie, 1991. – 384 s.
4. Popov D.N. Dinamika i regulirovanie gidro- i pnevmosistem. – M.: Mashinostroenie, 1987. – 464 s.
5. Sokolov V.I. Modelirovanie silovoj chasti avtomaticheskogo jelektrogidravlicheskogo привода s ob'emnym regulirovaniem / V.I. Sokolov, N.G. Azarenko, Ja.V. Sokolova // Visn. Shidnoukr. nacion. un-tu im. V. Dalja. – 2012. - № 12 (183). - Ch.1. – S. 260 - 270.
6. Kovalenko A.O. Osнови naukovih doslidzhen' (planuvannja eksperimentiv) / A.O. Kovalenko, A.S. Rogovij, D.O. S'omin. – Lugansk: SNU im. V. Dalja, 2011. – 216 s.
7. Dzhonson N. Statistika i planirovanie jeksperimenta v tehnikе i nauke: Metody planirovanija jeksperimenta / N. Dzhonson, F. Lion. – M.: Mir, 1981. – 520 s.
8. Adler Ju.P. Planirovanie jeksperimenta pri poiske optimal'nyh uslovij / Ju.P. Adler, E.V. Markova, Ju.V. Granovskij. – M.: Nauka, 1971. – 274 s.
9. Ludchenko A.A. Osнови nauchnyh issledovanij / A.A. Ludchenko, Ja.A. Ludchenko, T.A. Primak. – K.: Znanija, 2000. – 114 s.

### Рассказова Ю.Б. Експериментальні дослідження ефективності регулювання об'ємного гідроприводу.

Представлений експериментальний стенд та методика дослідження ефективності способів регулювання швидкості вихідної ланки об'ємного гідроприводу машинобудівного обладнання. Показана перевага регулювання швидкості зміною робочого об'єму насоса.

**Ключові слова:** машинобудівне обладнання, об'ємний гідропривід, гідромотор, об'ємний спосіб регулювання, дросельний спосіб регулювання.

### Rasskazova Yu.B. Experimental studies of the effectiveness of regulating of volume hydraulic drive.

An experiment stand and study of the effectiveness of different methods of adjusting the speed of output unit of volume hydraulic drive of engineering equipment is presented. The advantage of controlling the speed of change of the pump's working volume is showed.

**Key words:** engineering equipment, hydrostatic drive, hydraulic pump, the volumetric method of control, throttle control method.

**Рассказова Ю.Б.** – інженер кафедри машинобудування, верстатів та інструментів Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля

Рецензент: Соколов В.И., д.т.н., професор

Статья подана 10.11.2015.

УДК 621.9.048

## СИНТЕЗ ЭЛЕМЕНТОВ КЛАССИФИКАЦИИ ДЕТАЛЕЙ ПОДЛЕЖАЩИХ ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКЕ

Романченко А.В.

## SYNTHESIS OF CLASSIFICATION ELEMENTS OF DETAILS SUBJECT TO VIBRATION TREATMENT

Romanchenko A.V.

*В статье проанализированы конструктивные особенности деталей подлежащих вибрационной обработке. Рассмотрены классификации деталей обрабатываемых в свободных абразивах на вибрационных станках. В результате экспериментальных исследований установлен новый тип деталей ранее не обрабатываемых вибрационным методом. Дано определение и описаны характеристики детали с изменяемой геометрией. Построена классификация деталей подлежащих вибрационной обработке учитывающая новые элементы.*  
**Ключевые слова:** *вибрационная обработка, классификация, технологический процесс, станок, деталь с изменяемой геометрией.*

**1. Введение.** Одним из важнейших этапов обработки деталей является финишная обработка. Существует большое количество методов финишной обработки, однако среди данного множества вибрационная обработка заслуженно занимает одну из лидирующих позиций. Постоянный интерес со стороны ученых и специалистов позволяет данному методу непрерывно развиваться и эволюционировать, чему посвящается много фундаментальных исследований [1, 2, 3, 4, 5]. Основой создания любого технологического процесса, является условие обеспечения заданных заказчиком требований к качеству изделия при наименьшей его себестоимости и максимальной производительности. В связи с этим возникает необходимость создания различных технологических процессов, позволяющих обрабатывать вибрационным методом детали различных типов. Для сокращения и максимальной унификации разрабатываемых технологических процессов необходимо наличие высокоструктурированного классификатора наиболее полно отражающего все многообразие деталей подлежащих вибрационной обработке. Попытка создания классификатора такого рода осуществлялась неоднократно [6, 7, 8], однако

данная проблема требует дополнительных исследований.

**2. Анализ исследований и публикаций.** Анализ информационного источника [9], в котором классификация осуществляется по следующим признакам: материал детали (для выбора химической добавки), максимальные габариты детали (для выбора габаритов и объема контейнера), предварительная операция и форма детали (для выбора формы и грануляции единичных гранул, времени обработки) показал, что основным критерием при выборе технологического оборудования являются габаритные размеры детали, без учета их массы, как составляющей части всей массы загрузки контейнера (обрабатываемые детали и абразивный наполнитель). Соответственно, не учитывается необходимая мощность привода станка, а, следовательно, и последующее усилие взаимодействия гранулы и детали.

Классификация, приведенная в [10], учитывает форму обрабатываемой детали в целом и ее конструктивных элементов, габариты, массу и материал, дополнительно представлены рекомендации по выбору абразивных гранул, рабочих жидкостей и амплитудно-частотных характеристик. Однако данный подход не учитывает исходное состояние обрабатываемой поверхности.

Анализ изделий с учетом их материала и метода получения заготовки, операций вибрационной обработки, исходного и конечного состояния поверхностей, их габаритных размеров и сложности формы представлен в работе [7]. Но при этом не приводятся конкретные числовые значения параметров, используемых при группировании деталей по принятым признакам.

Следует отметить классификатор, предложенный в работе [6], его структурная схема представлена на рис. 1. Его основным недостатком является то, что он был разработан для одного станка (с объемом контейнера 120 л,  $A=0,2-4$  мм,  $f=30-42,5$  Гц), что предопределило диапазон по массам и габаритам обрабатываемых деталей.

Этими же авторами была введена классификация деталей по методу вибрационной обработки, учитывающая материал, габариты, формы и конструктивные элементы, исходное и конечное состояние поверхности, количество одновременно обрабатываемых деталей.

Следует отметить, что в описательной части, авторы рассуждают о необходимости при отнесении деталей к той или иной группе учитывать еще следующие дополнительные факторы: «... взаимосвязь габаритов и веса деталей; усложнение обработки деталей больших габаритов ввиду того, что в процессе вибрационной обработки они взаимно предохраняют обрабатываемые поверхности от воздействия абразивной среды; необходимость строгого соблюдения оптимального количества деталей, загружаемых в резервуар, так и его перегрузка резко усложняет условия обработки и увеличивает машинное время; ограничение габаритов деталей относительно размеров резервуара ... при определении максимально допустимого размера деталей было установлено, что он не должен превышать 1/3 ширины резервуара. Детали больших габаритов резко ухудшают

циркуляцию среды. Иногда она прекращается совсем». Также необходимо отметить, что существовали ограничения и по отношению массы обрабатываемого изделия к массе единичной гранулы в пределах 2,5...30 [6]. Тем самым сфера применения виброабразивного метода обработки ограничивалась. Данное утверждение не совсем корректно, когда речь идет именно об объемных деталях. И к длинномерным деталям с длиной более чем 1/3 и поперечным размером, равным 1/3 данное утверждение вообще не подходит, т.к. детали (особенно массивные) с выраженной симметрией занимают определенное неизменное положение в движущейся рабочей среде, т.е. длинномерные детали будут располагаться вдоль продольной оси контейнера. Переход на относительно высокочастотные станки, со сбалансированно используемыми амплитудами, позволяет создать помимо осциллирующих перемещений деталей и гранул устойчивый циркуляционный поток всей массы загрузки, тем самым обеспечивая обработку таких деталей.

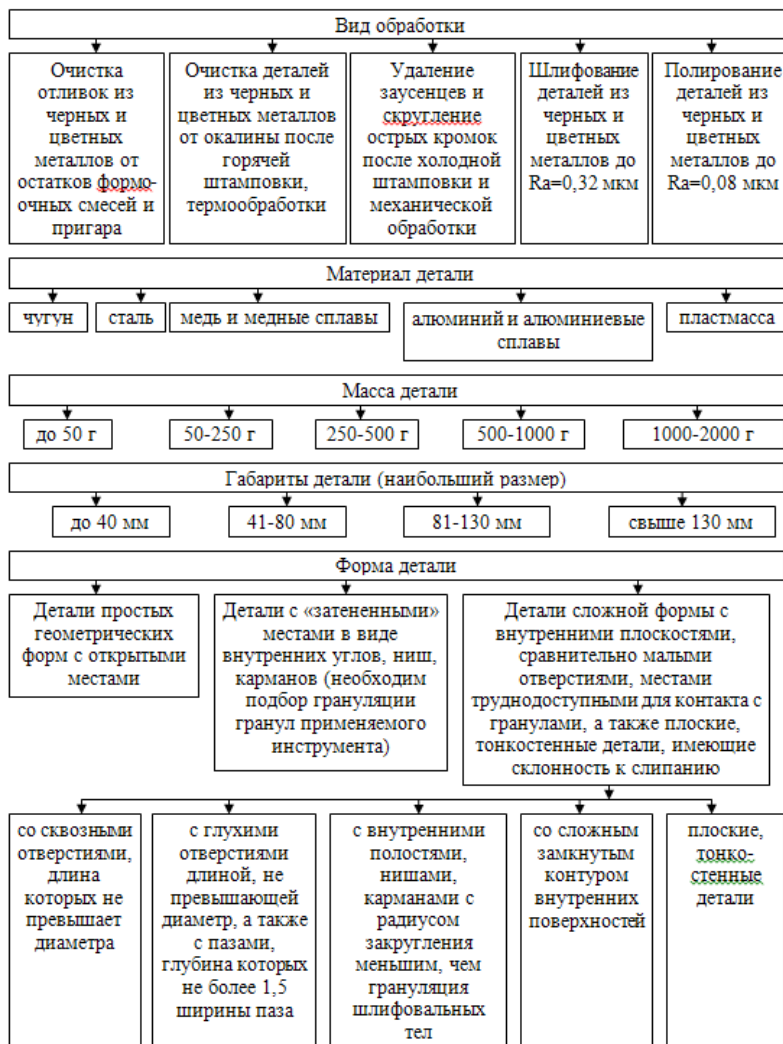


Рис. 1. Классификатор деталей подлежащих вибрационной обработке

**3. Цель исследования.** Целью данной статьи является анализ известных классификаций деталей подлежащих вибрационной обработке и построение классификации деталей с учетом новых элементов.

**4. Материалы и результаты исследования.**

В результате исследований посвященных вибрационной обработке длинномерных деталей [11] была представлена классификация учитывающая новые элементы. Расширение данной классификации основано на экспериментальном и теоретическом анализе новых элементов классификации, в качестве которых выступали длинномерные детали. В процессе данных исследований стало очевидным, что длинномерные детали обладают рядом свойств, которые могут кардинальным образом влиять на выбор технологического процесса. Детали могут обладать ограниченной и не ограниченной длиной – превышать или не превышать продольные размеры контейнера, они могут быть жесткими или нежесткими – исключать или не исключать возможность деформации детали абразивной средой. Важно учитывать и то, что данные признаки могут сочетаться в различных вариантах, например, деталь может быть не жесткой и не ограниченной длины, к таким деталям можно отнести проволоку представленную на рис. 2. или жесткой ограниченной длины, к таким деталям относятся трубы круглого сечения, на рис. 3. представлены трубы помещенные в контейнер вибрационного станка.



Рис. 2. Не жесткие детали не ограниченной длины



Рис. 3. Жесткие детали ограниченной длины в контейнере вибрационного станка

Новая характеристика геометрических размеров детали, изменяющаяся непосредственно в процессе вибрационной обработки возникла в результате цикла экспериментальных исследований по вибрационной обработке ювелирных изделий. Было установлено, что практически всю номенклатуру таких изделий можно отнести к деталям мелкой формы и малой массы. Кроме того, такие изделия могут обладать достаточно сложной формой при малой массе, что требует применения специального абразивного наполнителя в качестве рабочей среды. Как известно, его размеры должны обеспечивать обработку всей поверхности детали, включая ее наименьшие полости. Учитывая малые размеры деталей, таким абразивным наполнителем могут выступать абразивные порошки.

Детали обрабатывались классическим методом – внавал, в качестве представителей использовались кольца, кулоны, цепочки. С обработкой колец и кулонов проблем не возникало, однако обработка цепочек оказалась затруднительной. При обработке одной цепочки ее поведение было непредсказуемым, она могла менять свое положение, и, что особенно важно геометрические параметры. Говорить о детерминированности процесса обработки даже одной такой детали не представлялось возможным, при обработке двух и более изделий проблема усугублялась взаимным спутыванием деталей.

Стало очевидно, что для вибрационной обработки таких изделий необходимо применение специальных приспособлений. Кроме того такие детали оказалось сложно отнести к какому либо типу в известных классификациях, следовательно возникла необходимость формулировки точного определения. Изделия такого типа являются деталями с изменяемой геометрией – это детали, геометрические размеры и форма которых могут изменяться в процессе вибрационной обработки под воздействием рабочей среды без деформации. Важно отметить, что в отличие от нежестких длинномерных деталей, изменение формы которых под воздействием рабочей среды может привести к необратимой деформации, детали с изменяемой геометрией обладают достаточной жесткостью, и изменение их формы связано с наличием подвижных соединений. Как правило, деталями с изменяемой геометрией являются изделия, состоящие из нескольких деталей. Анализ таких изделий также показал, что детали такого типа могут быть мелких, средних и крупных размеров. Таким образом, данную характеристику необходимо вводить в классификацию деталей подлежащих вибрационной обработке как отдельный элемент. Схема классификации деталей с учетом нового элемента представлена на рис. 4.

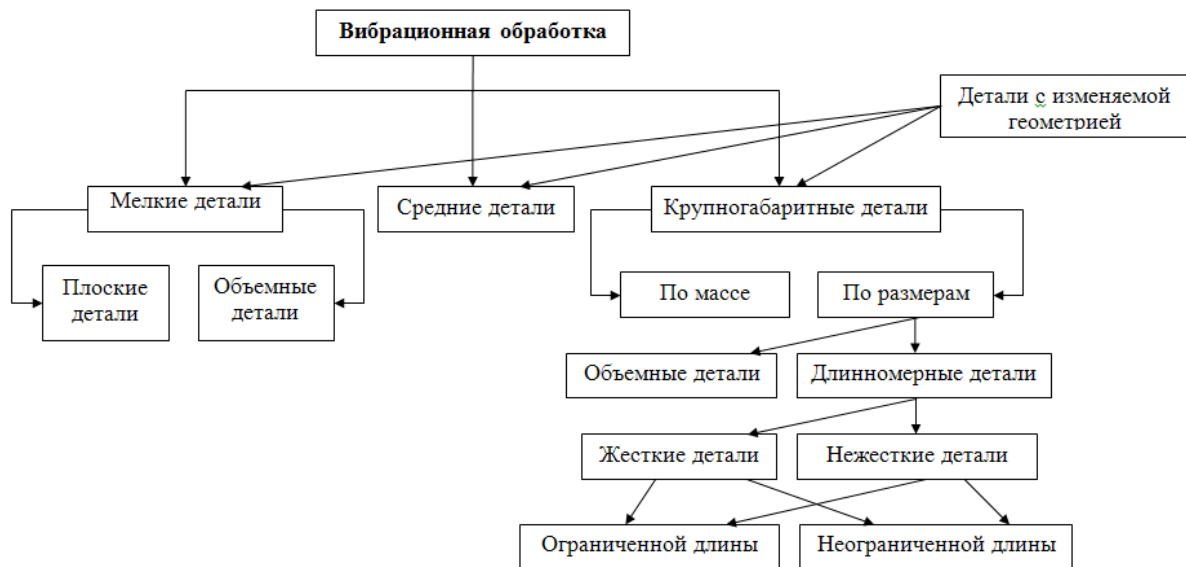


Рис. 4. Классификация деталей подлежащих вибрационной обработке с учетом новых элементов

Обобщая выше изложенные материалы также необходимо отметить, что при описании детали подлежащей вибрационной обработке важным является не единичная характеристика (например, размер или масса), а комплексное отношение учитывающее все характеристики данной детали в связи с рабочим инструментом – абразивным наполнителем и параметрами станка. При этом, непосредственно в процессе обработки, одна или несколько характеристик могут изменять свои параметры, тем самым оказывать влияние на детерминированность и качество процесса обработки.

**5. Выводы.** В результате исследования проведен анализ известных классификаций деталей подлежащих вибрационной обработке. Рассмотрены свойства длинномерных деталей. Установлены детали ранее не учитываемые в классификациях, описаны характеристики данных деталей. Дано определение изделия такого типа – детали с изменяемой геометрией. Представлена классификация деталей подлежащих вибрационной обработке с учетом новых элементов.

#### Л и т е р а т у р а

1. Применение вибрационных технологий на операциях отделочно-зачистной обработки деталей (очистка, мойка, удаление облоя и заусенцев, обработка кромок) / Под ред. А. П. Бабичева. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2010. – 287 с.
2. Бранспиз Е.В. Повышение эффективности виброабразивной обработки путем рационального выбора ее основных параметров [Текст]: дис... канд. тех. наук / Е.В. Бранспиз. – Луганск, 2001. – 265 с.
3. Тамаркин М.А. Интенсификация ударно-волновых явлений вибрационной обработки в результате наложения ультразвукового воздействия [Текст] / М.А. Тамаркин, И.Л. Вяликов, В.С. Минаков // Механика

ударно-волновых процессов в технологических системах. Сборник научных трудов международной технической конференции. – 2012. – С. 16-21.

4. ROSLER finding a better way...: Галтовочная техника / Линейные проходные установки: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.rosler.ru/produkte/gleitschlifftechnik/linear\\_du\\_rchlaufenanlagen](http://www.rosler.ru/produkte/gleitschlifftechnik/linear_du_rchlaufenanlagen).
5. ROSLER finding a better way...: Области применения / Галтовочная техника: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.rosler.ru/anwendungsgebiete/gleitschlifftechnik/>.
6. Обработка деталей свободными абразивами в вибрирующих резервуарах [Текст] / И.Н. Карташов, М.Е. Шаинский, В.А. Власов и др. – К.: Высшая школа, 1975. – 179 с.
7. Кулаков, Ю.М. Отделочно-зачистная обработка деталей [Текст] / Ю.М. Кулаков, В.А. Хрульков. – М.: Машиностроение, 1979. – 216 с.
8. Объемная вибрационная обработка [Текст] / И.Е. Бурштейн, В.В. Балицкий, А.Ф. Духовский и др.: под ред. И.Е. Бурштейна. – М.: ЭНИМС, 1977. – 108 с.
9. Міцик А.В. Підвищення ефективності обробки великогабаритних плоскісних виробів активізацією руху робочого середовища у коливних U-подібних контейнерах [Текст]: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.03.01 / Міцик Андрій Володимирович. – Х., 2008. – 20 с.
10. Бабичев А.П. Основы вибрационной технологии [Текст] / А.П. Бабичев, И.А. Бабичев. – Ростов-на-Дону, 1999. – 622 с.
11. Романченко А.В. Расширение технологических возможностей вибрационного оборудования за счет создания условий обработки длинномерных деталей [Текст]: дис... канд. тех. наук / А.В. Романченко. – Чернигов, 2011. – 203 с.

### References

1. Primenenie vibracionnyh tehnologij na operacijah otdelochno-zachistnoj obrabotki detalej (ochistka, mojka, udalenie obloja i zausencev, obrabotka kromok) / Pod red. A. P. Babicheva. – Rostov-na-Donu: DGTU, 2010. – 287 s.
2. Branspiz E.V. Povyshenie jeffektivnosti vibroabrazivnoj obrabotki putem racional'nogo vybora ee osnovnyh parametrov [Tekst]: dis... kand. teh. nauk / E.V. Branspiz. – Lugansk, 2001. – 265 s.
3. Tamarkin M.A. Intensifikacija udarno-volnovykh javlenij vibracionnoj obrabotki v rezul'tate nalozhenija ul'trazvukovogo vozdejstvija [Tekst] / M.A. Tamarkin, I.L. Vjalikov, V.S. Minakov // Mehanika udarno-volnovykh processov v tehnologicheskikh sistemah. Sbornik nauchnyh trudov mezhdunarodnoj tehnicheckoj konferencii. – 2012. – S. 16-21.
4. ROSLER finding a better way...: Galtovochnaja tehnika / Linejnye prohodnye ustanovki: [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: [http://www.rosler.ru/produkte/gleitschlifftechnik/linear\\_d\\_urchlaufenanlagen](http://www.rosler.ru/produkte/gleitschlifftechnik/linear_d_urchlaufenanlagen).
5. ROSLER finding a better way...: Oblasti primenenija / Galtovochnaja tehnika: [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.rosler.ru/anwendungsgebiete/gleitschlifftechnik/>.
6. Obrabotka detalej svobodnymi abrazivami v vibrirujushhix rezervuarah [Tekst] / I.N. Kartashov, M.E. Shainskij, V.A. Vlasov i dr. – K.: Vysshaja shkola, 1975. – 179 s.
7. Kulakov, Ju.M. Otdelochno-zachistnaja obrabotka detalej [Tekst] / Ju.M. Kulakov, V.A. Hrul'kov. – M.: Mashinostroenie, 1979. – 216 s.
8. Ob#emnaja vibracionnaja obrabotka [Tekst] / I.E. Burshtejn, V.V. Balickij, A.F. Duhovskij i dr.: pod red. I.E. Burshtejna. – M.: JeNIMS, 1977. – 108 s.
9. Micik A.V. Pidvishhennja efektyvnosti obrobki velikogabaritnih ploskisnih virobiv aktivizaciju ruhu robochogo seredovishha u kolivnih U-podibnih kontejnerah [Tekst]: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk: 05.03.01 / Micik Andrij Volodimirovich. – H., 2008. – 20 s.
10. Babichev A.P. Osnovy vibracionnoj tehnologii [Tekst] / A.P. Babichev, I.A. Babichev. – Rostov-na-Donu, 1999. – 622 s.
11. Romanchenko A.V. Rasshirenie tehnologicheskikh vozmozhnostej vibracionnogo oborudovanija za schet sozdanija uslovij obrabotki dlennomernykh detalej [Tekst]: dis... kand. teh. nauk / A.V. Romanchenko. – Chernigov, 2011. – 203 s.

### Романченко О. В. Синтез елементів класифікації деталей що підлягають вібраційній обробці

*У статті проаналізовані конструктивні особливості деталей які підлягають вібраційній обробці. Розглянуто класифікації деталей оброблюваних у вільних абразивах на вібраційних верстатах. У результаті експериментальних досліджень встановлено новий тип деталей які раніше не обробляли вібраційним методом. Дано визначення і описані характеристики деталі із змінною геометрією. Побудована класифікація деталей які підлягають вібраційній обробці з врахуванням нових елементів*

**Ключові слова:** вібраційна обробка, класифікація, технологічний процес, верстат, деталь із змінною геометрією.

### Romanchenko A. V. Synthesis of classification elements of details subject to vibration treatment

*The known classification of parts processed in free abrasive vibration machines considered. It is found that these classifications do not represent the whole range of items processed by the oscillation method. The basis of such classifications as a rule based on the principle of parts separation by one main characteristic. General design features of details subject to vibrational treatment analyzed in the article. The properties of long type details processed on passage and no passage vibrating machines with U-shaped containers described. As a result of experimental studies new type of parts previously not processed by vibrating method established. Definition and characteristics of details with variable geometry is given. It is indicated that such details may refer to small, medium and large parts. It is established that the creation of a deterministic movement of the working environment requires a comprehensive assessment of t part characteristics. A classification of parts subject to vibration treatment which takes into account new elements is built.*

**Keywords:** vibration treatment, classification, technological process, machine, detail with variable geometry.

**Романченко Алексей Владимирович** – к.т.н., доцент кафедри машинобудування, верстатів та інструментів Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, [romanchenkoav@mail.ru](mailto:romanchenkoav@mail.ru)

Рецензент: **Осенін Ю.І.**, д.т.н., проф.

Стаття подана 20.10.2015.

УДК 697

## ИЗМЕРЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИМЕСИ В КАНАЛАХ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ

Соколов В.И.

## MEASUREMENT OF ADMIXTURE CONCENTRATION IN CHANNELS OF VENTILATION SYSTEMS.

Sokolov V.I.

*Рассматривается вопрос измерения концентрации примеси в газозвудушных потоках. Для определения местоположения датчика, соответствующего средней концентрации примеси, решается задача о диффузии в потоке плоского кругового источника. На основе аналитического решения показано, что равномерная концентрация устанавливается на расстоянии 30 и более диаметров канала от места выброса примеси. В случае, когда нельзя реализовать данные требования, рекомендуется размещать датчик концентрации на расстоянии 0,62 радиуса трубы от ее оси.*

**Ключевые слова:** промышленные выбросы, примесь, концентрация, диффузия.

### Постановка проблемы

Ведение многих технологических процессов в химической, нефтеперерабатывающей, горнодобывающей промышленности, энергетике и других отраслях народного хозяйства сопровождается выбросами в атмосферу вредных для здоровья человека и окружающей природной среды отходов производственной деятельности, которые осуществляются вентиляционными системами. Кроме того, промышленные выбросы обусловлены необходимостью поддержания требуемых санитарно-гигиенических норм в производственных помещениях. Поэтому от точности контроля состава и объема выбросов во многом зависит как здоровье человека, так и экологическая ситуация. Достоверный контроль параметров промышленных выбросов позволяет рационально решать вопросы плановых мероприятий по модернизации вентиляционных систем и коррекции технологических процессов, предотвращать аварийные ситуации, разрабатывать программы по повышению экологической безопасности.

### Анализ последних исследований и публикаций

В большинстве случаев выброс вредных компонентов осуществляется централизованной

подачей в выходную вентиляционную трубу, где организуется пробоотбор газозвудушной среды для измерения концентрации примеси. Поскольку равномерная концентрация примеси по сечению трубы устанавливается на определенном расстоянии от места выброса [1, 2], важно знать место установки датчика концентрации, которое достоверно определяет среднюю концентрацию примеси в газозвудушном потоке. Для расчета параметров и характеристик газозвудушных потоков каналов вентиляционных систем можно использовать известные теоретические подходы [1].

В тех случаях, когда невозможна организация контроля на требуемом расстоянии от места выброса, повысить точность измерения можно установкой датчика в точке сечения канала, где действительная концентрация соответствует среднему значению. С этой целью необходимо решить задачу о диффузии плоского кругового источника радиуса  $r_k$  в турбулентном потоке в круглой цилиндрической трубе радиуса  $r_0$ , которая является типичной для вентиляционных систем энергоблоков атомных станций, химических производств и т.п.

### Цель статьи

Целью работы является разработка рекомендаций для измерения концентрации примеси в газозвудушных потоках каналов вентиляционных систем.

### Материалы и результаты исследования

В цилиндрической системе координат ( $r$  - радиус,  $x$  - осевая координата) уравнение турбулентной диффузии [3, 4] в осесимметричном потоке представляется следующим образом

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u_x \frac{\partial C}{\partial x} + u_r \frac{\partial C}{\partial r} = f(x, r, t) + D_e \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} + \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} \right),$$

где  $C$  – концентрация,  $t$  – время,  $u_x, u_r$  – осевая и радиальная составляющие скорости;  $D_e$  – коэффициент турбулентной (вихревой) диффузии;  $f(x, r, t)$  – функция объемной плотности мощности источников примеси.

Примем допущение, что скорость потока постоянная по направлению и величине, равной средней скорости потока  $u_0$ ,

$$u_x = u_0; u_r = 0.$$

Тогда имеем следующее уравнение диффузии

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u_0 \frac{\partial C}{\partial x} = f(x, r, t) + D_e \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} + \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} \right). \quad (1)$$

Граничное условие к данному уравнению вытекает из требования отсутствия проникновения примеси сквозь стенки трубы и сводится к равенству нулю нормальной производной на границе

$$\left. \frac{\partial C}{\partial r} \right|_{r=r_0} = 0.$$

Начальное условие требует равенства нулю концентрации в трубе до включения источника

$$C|_{t=0} = 0.$$

Функцию плотности для импульсного плоского кругового источника, расположенного в начале координат, зададим следующим образом

$$f(x, r, t) = \delta(x)H(r_k - r),$$

где  $\delta(x)$  – функция Дирака;  $H(r_k - r)$  – функция Хевисайда [5].

Сделаем в уравнении (1) замену переменных

$$z = x - u_0 t,$$

т.е. перейдем в систему координат, которая движется с потоком. При этом, функция  $C(x, r, t)$  перейдет в функцию  $w(z, r, t)$ , а функция  $f(x, r, t)$  в

$$F(z, r, t) = \delta(z + u_0 t)H(r_k - r).$$

Производные преобразуются согласно выражениям

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} &= \frac{\partial w}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial w}{\partial t} = -u_0 \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial t}; \\ \frac{\partial C}{\partial x} &= \frac{\partial w}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial z}; \\ \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial C}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \\ &= \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \frac{\partial z}{\partial x} = \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}. \end{aligned}$$

Подставляем данные соотношения в уравнение (1) и после преобразований получаем

$$\frac{\partial w}{\partial t} = D_e \left( \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \right) + \delta(z + u_0 t)H(r_k - r). \quad (2)$$

Таким образом, имеем обычное неоднородное уравнение диффузии.

Аналитическое решение уравнения (2) получено известными приемами математической физики [6] и имеет вид

$$\begin{aligned} w(z, r, t) &= \frac{r_k}{\sqrt{\pi r_0}} \int_0^t \frac{\exp \left[ -\frac{(z + u_0 \tau)^2}{4D_e(t - \tau)} \right]}{\sqrt{D_e(t - \tau)}} \times \\ &\times \sum_{n=1}^{\infty} \exp \left( -\left( \frac{\mu_n}{r_0} \right)^2 D_e(t - \tau) \right) \times \\ &\times \frac{J_1 \left( \frac{\mu_n}{r_0} r_k \right) J_0 \left( \frac{\mu_n}{r_0} r \right)}{\mu_n J_0^2(\mu_n)} dt. \end{aligned}$$

где  $J_0$  и  $J_1$  – функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка;  $\mu_n$  – корни уравнения  $J_0'(\mu) = 0$ .

С помощью замены  $z = x - u_0 t$  переходим к неподвижной системе координат

$$C(x, r, t) = \frac{r_k}{\sqrt{\pi r_0}} \int_0^t \frac{\exp \left[ -\frac{(x - u_0(t - \tau))^2}{4D_e(t - \tau)} \right]}{\sqrt{D_e(t - \tau)}} \times$$

$$\times \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(-\left(\frac{\mu_n}{r_0}\right)^2 D_e(t-\tau)\right) \times \frac{J_1\left(\frac{\mu_n}{r_0} r_k\right) J_0\left(\frac{\mu_n}{r_0} r\right)}{\mu_n J_0^2(\mu_n)} dt.$$

Эта функция и дает решение задачи о диффузии в потоке плоского кругового источника радиуса с  $r_k$  центром в начале координат.

В безразмерном виде полученное решение представляется следующим образом

$$\bar{C}(\bar{x}, \bar{r}, \bar{t}) = \frac{\bar{r}_k}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\bar{t}} \frac{\exp\left[-\frac{Pe_{\theta}(\bar{x} - (\bar{t} - \tau))^2}{16(\bar{t} - \tau)}\right]}{\sqrt{4(\bar{t} - \tau) Pe_{\theta}}} \times \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(-\mu_n^2 \frac{4(\bar{t} - \tau)}{Pe_{\theta}}\right) \frac{J_1(\mu_n \bar{r}_k) J_0(\mu_n \bar{r})}{\mu_n J_0^2(\mu_n)} dt.$$

где  $\bar{C} = C/C_0$  - безразмерная концентрация ( $C_0$  - средняя концентрация);

$\bar{X} = x/d, \bar{r} = r/r_0 = 2r/d$  - безразмерные координаты ( $d$  - диаметр трубы);

$\bar{r}_k = r_k/r_0 = 2r_k/d$  - безразмерный радиус источника;  $\bar{t} = tu_0/d$  - безразмерное время;

$Pe_{\theta} = Re Sc$  - диффузионное число Пекле ( $Re = u_0 d/\nu$  - число Рейнольдса;  $\nu$  - кинематическая вязкость;  $Sc = \nu/D_e$  - число Шмидта).

На рис. 1 представлена зависимость безразмерной концентрации примеси на оси трубы от расстояния до плоского кругового источника для различных его размеров при  $Pe_{\theta}=368$  и в момент времени  $\bar{t} = 0,1Pe_{\theta} = 3.68$ . Как видно из рисунка, с увеличением расстояния от источника все кривые выходят на один уровень

На рис.2 показано распределение концентрации примеси по радиусу трубы на расстоянии  $10d$  от плоского кругового источника для различных его размеров. Как и следовало ожидать, при увеличении размера источника распределение становится более равномерным. Интересно отметить, что все кривые пересекаются в одной точке, лежащей на расстоянии  $0.62$  радиуса трубы от ее оси. Это значит, что если датчик концентрации поместить в этой точке, он покажет значение средней концентрации в потоке.

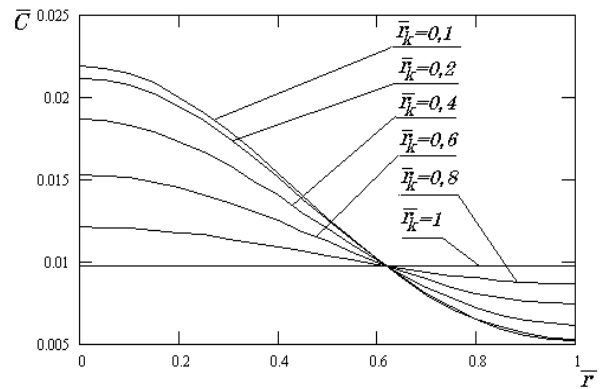


Рис. 1. Зависимость концентрации на оси трубы от расстояния до источника

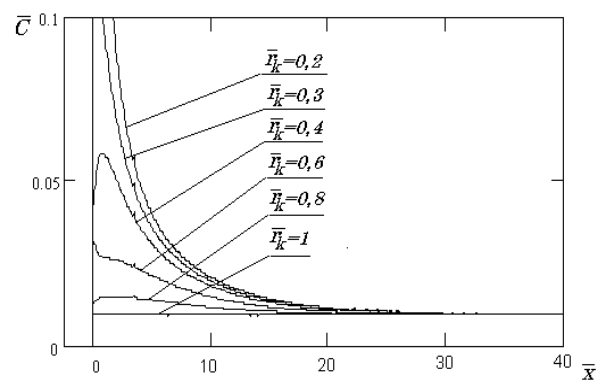


Рис.2. Распределение концентрации по радиусу на расстоянии  $10d$  от источника

Наиболее точную информацию о степени равномерности распределения дает величина отношения концентрации у стенок трубы к концентрации на оси. Ее величина изменяется от нуля при полностью неоднородном распределении, до единицы при полностью равномерном. Зависимость этой величины от расстояния до источника при различных размерах источника приведена на рис. 3. Так, при расстояниях более  $30d$ , степень равномерности не менее  $0.95$  для всех размеров источника.

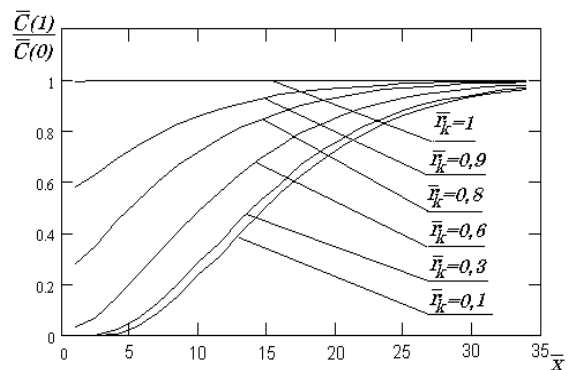


Рис.3. Зависимость отношения концентрации у стенок к концентрации на оси от расстояния до источника

### Выводы

Таким образом, для измерения концентрации примеси в потоке датчик следует устанавливать на расстоянии 30 диаметров канала и более от источника примеси, что обеспечивает погрешность измерения средней концентрации менее 5%. В том случае, когда нельзя реализовать данные рекомендации, для повышения точности следует организовать измерение на расстоянии 0.62 радиуса трубы от ее оси, где действительная концентрация примеси в газоздушном потоке соответствует среднему значению.

### Литература

1. Недопекин Ф.В. Диффузионные процессы в стационарных газовых потоках / Ф.В. Недопекин, А.А. Коваленко, В.И. Соколов, Г.С. Калюжный, Н.Д. Андрийчук. – Луганск: ВНУ им. В. Даля, 2007. – 224 с.
2. Retherford Aris. Introduction to the Analysis of Chemical Reactors. Departments of Chemical Engineering University of Minnesota. Prentice - Hall. Inc., New Jersey, 1967. - 340 p.
3. Соколов В.И. Инженерные задачи диффузии примеси в потоке / В.И. Соколов, А.А. Коваленко, Г.С. Калюжный, С.А. Минин. – Луганск: ВУГУ, 2000 – 168 с.
4. Коваленко А.А. Основы технической механики жидкостей и газов: учебное пособие для вузов / А.А. Коваленко, В.И. Соколов, А.Х. Дымнич, П.Е. Уваров. - Луганск: ВУГУ, 1998. - 272 с.
5. Иванов В.А., Медведев В.С., Чемоданов Б.К., Ющенко А.С. Математические основы теории автоматического регулирования / Под ред. Б.К. Чемоданова. – М.: Высшая школа, 1971. – 808 с.
6. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1979. – 736 С.

### References

1. Nedopekin F.V. Diffuzionnye processy v stacionarnykh gazovykh potokah / F.V. Nedopekin, A.A. Kovalenko, V.I. Sokolov, G.S. Kaljuzhnyj, N.D. Andrijchuk. – Lugansk: VNU im. V. Dalja, 2007. – 224 s.
2. Retherford Aris. Introduction to the Analysis of Chemical Reactors. Departments of Chemical Engineering University of Minnesota. Prentice - Hall. Inc., New Jersey, 1967. - 340 p.
3. Sokolov V.I. Inzhenernye zadachi diffuzii primesi v potoke / V.I. Sokolov, A.A. Kovalenko, G.S. Kaljuzhnyj, S.A. Minin. – Lugansk: VUGU, 2000 – 168 s.
4. Kovalenko A.A. Osnovy tehniczeskoj mehaniki zhidkостей i gazov: uchebnoe posobie dlja vuzov / A.A. Kovalenko,

V.I. Sokolov, A.H. Dymnich, P.E. Uvarov. - Lugansk: VUGU, 1998. - 272 s.

5. Ivanov V.A., Medvedev V.S., Chemodanov B.K., Jushhenko A.S. Matematicheskie osnovy teorii avtomaticheskogo regulirovanija / Pod red. B.K. Chemodanova. – М.: Vysshaja shkola, 1971. – 808 s.
6. Tihonov A.N., Samarskij A.A. Uravnenija matematicheskoy fiziki. – М.: Nauka, 1979. – 736 S.

### Соколов В.І. Вимірювання концентрації домішок в каналах вентиляційних систем.

*Розглядається питання вимірювання концентрації домішки в газоповітряних потоках. Для визначення місцеположення датчика, відповідного середньої концентрації домішки, вирішується задача про дифузію в потоці плоского кругового джерела. На основі аналізу аналітичного рішення показано, що рівномірна концентрація встановлюється на відстані 30 і більш діаметрів каналу від місця викиду домішки. У разі, коли не можна реалізувати дані вимоги, рекомендується розміщувати датчик концентрації на відстані 0.62 радіуса труби від її осі.*

**Ключові слова:** промислові викиди, домішка, концентрація, дифузія.

### Sokolov V.I. Measurement of admixture concentration in channels of ventilation systems.

*The problem of concentration measurement of admixture in gas-aero streams is considered. For determination of a site of the gauge appropriate to average concentration of admixture, the problem about a diffusion in a stream of a flat circular source is decided. Because of analysis of an analytical solution is shown, that uniform the concentration is installed on a distance 30 and more diameters of the channel from a place of an ejection of admixture. In case, when it is impossible to realize this request, it is recommended to place the gauge of concentration on a distance 0.62 radiuses of a pipe from its axes.*

**Key words:** industrial ejections, admixture, concentration, diffusion.

**Соколов В.І.** – декан факультету машинознавства та електромеханіки, завідувач кафедри машинобудування, верстатів та інструментів Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля.

*Рецензент:* **Осенін Ю.І.**, д.т.н., проф.

Стаття подана 05.10.2015.

УДК 697

## КРИТЕРИАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДИФФУЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ ВЕНТИЛЯЦИИ

Соколов В.И.

## CRITERION ANALYSIS OF DIFFUSIVE PROCESSES IN VENTILATION SYSTEMS

Sokolov V.I.

*Проведен анализ критериальных соотношений для диффузионных процессов в газовых потоках цилиндрических каналов вентиляционных систем. Для коэффициента турбулентной диффузии использовано эмпирическое выражение Хинце, а для коэффициента сопротивления трения универсальная формула Альтшуля. Получена зависимость диффузионного числа Пекле от числа Рейнольдса. Обосновано наличие и установлена граница автоточной зоны в диффузионных процессах. Показано, что изменение диффузионного числа Пекле для диапазона значений чисел Рейнольдса  $Re > 1,3 \cdot 10^5$  составляет не более 5% при значениях относительной шероховатости  $\Delta$  свыше 0,001.*

**Ключевые слова:** вентиляционная система, диффузионный процесс, число Шмидта, число Рейнольдса, диффузионное число Пекле.

**Постановка проблемы.** Проектирование и разработка вентиляционных систем, охлаждающих устройств, теплосиловых установок связано с расчетом процессов диффузии аэрозолей в турбулентных газовых потоках [1 – 3]. Кроме того, анализ процессов диффузии примесей в газовых потоках является определяющим при измерениях выбросов через вентиляционные системы промышленных предприятий, шахт, энергоблоков атомных станций, при разработке систем теплогазоснабжения и т.п. Достоверный контроль параметров промышленных выбросов позволяет рационально решать вопросы по модернизации вентиляционных систем и коррекции технологических процессов, предотвращать аварийные ситуации, разрабатывать мероприятия по повышению экологической безопасности.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Диффузия примеси в турбулентном газовом потоке является сложным нестационарным процессом [1, 2], описываемым дифференциальными уравнениями в частных производных. Примесью называют «постороннее вещество» [2, 3], содержащееся в сравнительно небольшом количестве в объемах газовой среды.

«Постороннее вещество» содержится в виде жидких, твердых или газообразных объектов (включений). Если наличие примеси не оказывает влияние на физические свойства газовой среды и на формирование поля скорости в турбулентном потоке, то такую примесь считают пассивной. В случае пассивной примеси характеристики турбулентного потока, измеренные в потоке «чистой» (не содержащей рассматриваемую примесь) среды, можно использовать для расчета движения частиц этой примеси в пространстве, занятым таким же потоком, несущим примесь. Ввиду сложности исследования диффузионных процессов в инженерной практике нашли применения как аналитические, так и полуэмпирические методы исследования [1,3].

**Цель статьи.** Целью работы является исследование диффузионных процессов в турбулентных газовых потоках цилиндрических каналов вентиляционных систем на основе анализа критериальных соотношений.

**Материалы и результаты исследования.** Актуальной (мгновенной местной) концентрацией примеси является величина [1-3]

$$C(x, y, z, t) = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m_n}{\Delta V}, \quad (1)$$

где  $\Delta V$  - некоторый малый объем части пространства, выделенный вокруг точки с координатами  $x, y, z$ ;  $\Delta m_n$  - масса примеси, которая находится в этом объеме в момент времени  $t$ .

Актуальная концентрация в каждой точке пространства, занятого турбулентным потоком, претерпевает беспорядочные изменения во времени (пульсирует, флуктуирует). При решении практических задач о движении частиц примеси от актуальной характеристики переходят к осредненному значению концентрации. В случае установившегося турбулентного движения и

стационарных внешних условий используется введенное Рейнольдсом временное осреднение

$$\langle C(x, y, z) \rangle = \frac{1}{t_0} \int_t^{t+t_0} C(x, y, z) dt, \quad (2)$$

где  $t_0$  - выбранный соответствующим образом интервал времени.

Стационарная диффузия газовых примесей в каналах вентиляционных систем может быть описана уравнением турбулентной диффузии примеси в однородной несжимаемой среде [3], которое в декартовой системе координат имеет вид (индекс “<...>” осредненного значения в дальнейшем опускаем)

$$u_x \frac{\partial C}{\partial x} + u_y \frac{\partial C}{\partial y} + u_z \frac{\partial C}{\partial z} = f(x, y, z) + D_e \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

где  $f(x, y, z)$  - объемная плотность мощности источников молекул примеси;  $D_e$  - коэффициентом вихревой (турбулентной) диффузии.

Коэффициент турбулентной диффузии устанавливают или на основе экспериментальных данных, или на дополнительных гипотезах. Отметим известную эмпирическую формулу для круглых труб, приведенную в работе Хинце [4]

$$D_e = 0,02 u_0 d \sqrt{\lambda}. \quad (4)$$

Здесь  $u_0$  - скорость потока в трубе,  $d$  - диаметр трубы,  $\lambda$  - коэффициент гидравлического сопротивления трения. Данное выражение

$$D_e = 0,02 u_0 d \sqrt{\lambda} = 0,02 \frac{u_0 d}{v} v \sqrt{\lambda}$$

или

$$D_e = 0,02 \text{Re} v \sqrt{\lambda}. \quad (5)$$

где  $\text{Re}$  - число Рейнольдса.

Коэффициент гидравлического сопротивления трения  $\lambda$  при турбулентном режиме течения достаточно точно определяется по универсальной формуле Альтшуля [5, 6]

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{\Delta}{d} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25}, \quad (6)$$

где  $\Delta$  - абсолютная шероховатость внутренней поверхности канала.

Вводим безразмерные скорости, координаты и концентрацию

$$\bar{u}_x = u_x / u_0; \quad \bar{u}_y = u_y / u_0, \quad \bar{u}_z = u_z / u_0; \\ \bar{x} = x / d_z, \bar{y} = y / d_z, \bar{z} = z / d_z; \quad \bar{C} = C / C_o;$$

где  $C_o$  - масштаб концентрации примеси в канале;  $d_z$  - гидравлический диаметр, величина которого для каналов некруглой формы равна  $d_z = 4S/n$  ( $S$  - площадь поперечного сечения,  $n$  - его периметр).

**Уравнение диффузии для безразмерных переменных приводим к виду**

$$\bar{u}_x \frac{\partial \bar{C}}{\partial \bar{x}} + \bar{u}_y \frac{\partial \bar{C}}{\partial \bar{y}} + \bar{u}_z \frac{\partial \bar{C}}{\partial \bar{z}} = \\ = \bar{f}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) + \frac{1}{\text{Re} \text{Sc}} \left( \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial \bar{y}^2} + \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial \bar{z}^2} \right). \quad (7)$$

Здесь число Шмидта (или диффузионное число Прандтля)

$$\text{Sc} = \text{Pr}_\delta = \frac{\nu}{D_e}, \quad (8)$$

а выражение

$$\bar{f}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) = \frac{d_z}{u_o C_o} f(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$$

есть безразмерная объемная плотность мощности источников молекул примеси.

Как следует из уравнения (7) длина пути выравнивания концентрации примеси в канале определяется параметрами газового потока, которые можно задать двумя безразмерными критериями: числом Рейнольдса  $\text{Re}$  и Шмидта  $\text{Sc}$ ; а также характером источника примеси и формой канала.

В случае стационарного диффузионного процесса и источника примеси молекул геометрические параметры процесса будут зависеть от произведения числа Рейнольдса на число Шмидта, которое принято называть диффузионным числом Пекле

$$\text{Pe}_\delta = \text{Re} \text{Sc}. \quad (9)$$

Свяжем число Шмидта с числом Рейнольдса, для чего в (8) подставим (5)

$$\text{Sc} = \frac{\nu}{D_e} = \frac{50}{\text{Re} \sqrt{\lambda}},$$

а затем сюда выражение (6)

$$Sc = \frac{50}{Re \sqrt{0,11 \left( \frac{\Delta}{d_2} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}}} = \frac{151}{Re(\bar{\Delta} + 68/Re)^{0,125}}, \quad (10)$$

где относительная шероховатость внутренней поверхности канала  $\bar{\Delta} = \Delta/d_2$ .

Подстановка (10) в (9) дает

$$Pe_d = 151(\bar{\Delta} + 68/Re)^{-0,125}. \quad (11)$$

Зависимость диффузионного числа Пекле от числа Рейнольдса представлена на рис. 1. Приведенный результат показывает, что при больших значениях относительной шероховатости величина диффузионного числа Пекле не зависит от числа Рейнольдса. Это означает наличие в диффузионных процессах автомодельной зоны, когда длина пути выравнивания концентрации примеси не будет зависеть от параметров газового потока. Анализируя установленные зависимости можно утверждать, что изменение диффузионного числа Пекле для диапазона значений чисел Рейнольдса  $Re > 1,3 \cdot 10^5$  составляет не более 5% при значениях относительной шероховатости  $\bar{\Delta}$  свыше 0,001.

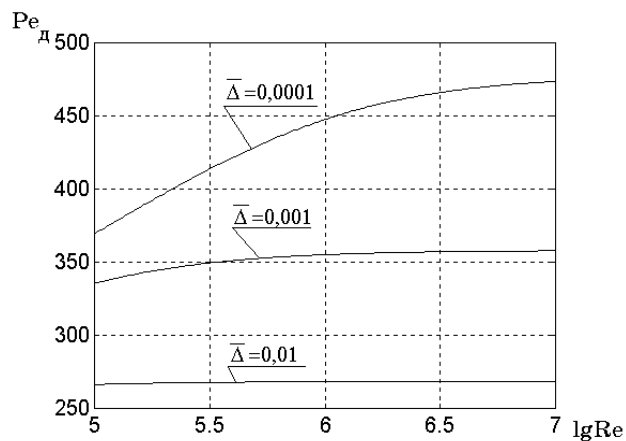


Рис. 1. Зависимость диффузионного числа Пекле от числа Рейнольдса

**Выводы.** Таким образом, на основе полуэмпирических зависимостей для коэффициента турбулентной диффузии и коэффициента сопротивления трения проведен анализа критериальных соотношений для диффузионных процессов в газовых потоках в цилиндрических каналах вентиляционных систем. Показано наличие и установлена граница автомодельной зоны в диффузионных процессах.

**Литература**

1. Недопекин Ф.В. Диффузионные процессы в стационарных газовых потоках / Ф.В. Недопекин, А.А. Коваленко, В.И. Соколов, Г.С. Калужный, Н.Д. Андрийчук. – Луганск: ВНУ им. В. Даля, 2007. – 224 с.
2. Retherford Aris. Introduction to the Analysis of Chemical Reactors. Departments of Chemical Engineering University of Minnesota. Prentice - Hall, Inc., New Jersey, 1967. - 340 p.
3. Соколов В.И. Инженерные задачи диффузии примеси в потоке / В.И. Соколов, А.А. Коваленко, Г.С. Калужный, С.А. Минин. – Луганск: ВУГУ, 2000 – 168 с.
4. Хинце И.О. Турбулентность. - М.: Физматгиз, 1963. - 680 с.
5. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. - М.: Энергоиздат, 1960. -463 с.
6. Коваленко А.А. Основы технической механики жидкостей и газов: учебное пособие для вузов / А.А. Коваленко, В.И. Соколов, А.Х. Дымнич, П.Е. Уваров. - Луганск: ВУГУ, 1998. - 272 с.

**References**

1. Diffusion processes in stationary gas flows / F.V. Nedopyokin [etc.]. - Lugansk: Publishing house of Volodymyr Dal East-Ukrainian National University, 2007. - 224 p.
2. Retherford Aris. Introduction to the Analysis of Chemical Reactors. Departments of Chemical Engineering University of Minnesota. Prentice - Hall, Inc., New Jersey, 1967. - 340 p.
3. Engineering problems of impurity diffusion in the flow / V.I. Sokolov [etc.]. - Lugansk: Publishing house of Volodymyr Dal East-Ukrainian National University, 2000. - 168 p.
4. I.O. Hince. Turbulence. – М.: Phizmatgiz, 1963. – 680 p.
5. I.E. Idelchik. Handbook of hydraulic resistance. – М.: Energoizdat, 1960. – 463 p.
6. Fundamentals of Technical Mechanics of fluids: a manual for schools / A.A. Kovalenko [etc.]. - Lugansk: Publishing house of Volodymyr Dal East-Ukrainian National University, 1998. - 272 p.

**Соколов В.І. Критеріальний аналіз дифузійних процесів в системах вентиляції**

Проведений аналіз критеріальних співвідношень для дифузійних процесів в газових потоках циліндричних каналів вентиляційних систем. Для коефіцієнта турбулентної дифузії використаний емпіричний вираз Хінце, а для коефіцієнту опору тертя універсальна формула Альтигуля. Обґрунтована наявність та встановлена границя автомодельної зони в циліндричних каналах. Показано, що зміна дифузійного числа Пекле для діапазону чисел Рейнольдса  $Re > 1,3 \cdot 10^5$  складає не більш 5% при значеннях відносної шероховатості  $\bar{\Delta}$  понад 0,001.

**Ключові слова:** вентиляційна система, дифузійний процес, число Шмідта, число Рейнольдса, дифузійне число Пекле.

**Sokolov V.I. Criterion analysis of diffusive processes in ventilation systems**

The analysis of criterion correlations for diffusive processes in gas streams in the cylindrical ductings of vent systems are conducted. A presence is shown and the border of automodel area is set in diffusive processes.

**Key words:** *Ventilation system, diffusive process, Schmidt's number, Reynolds number, diffusive Pellets number.*

**Соколов В.І.** – декан факультету машинознавства та електромеханіки, завідувач кафедри машинобудування, верстатів та інструментів Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля.

*Рецензент:* **Осенін Ю.І.**, д.т.н., проф.

Стаття подана 05.10.2015

УДК 621.646 : 62-83

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОМАТИЧЕСКОГО ГИДРОПРИВОДА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Соколова Я.В., Рассказова Ю.Б.

## MODELING OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF AUTOMATIC ELECTROHYDRAULIC DRIVE OF MACHINE BUILDING EQUIPMENT

Ya.V. Sokolova, Yu.B. Rasskazova

*Предложены математические модели динамических характеристик автоматического электрогидравлического привода с объемным регулированием машиностроительного оборудования. Представлены структурные схемы математических моделей оборудования с гидроприводом вращательного действия как объекта автоматического управления. Выполнена экспериментальная проверка адекватности разработанных математических моделей.*

**Ключевые слова:** насос, гидромотор, объемное регулирование, передаточная функция, структурная схема, переходной процесс.

### Постановка проблемы.

Расширение функциональных возможностей и повышение эффективности машиностроительного оборудования, в частности, оборудования для механической обработки материалов, может быть достигнуто разработкой и применением систем автоматического управления [1, 2]. Достижение произвольной кинематики рабочего органа, возможности программной реализации оптимальных законов его движения обеспечивается применением гидроприводов и, в частности, автоматических электрогидравлических приводов (ЭГП) с объемным регулированием в оборудовании мощностью свыше 8 кВт. Применение гидропривода в машиностроительном оборудовании позволяет упростить кинематику станков, снизить металлоемкость, повысить точность, надежность и уровень автоматизации. Широкое использование гидроприводов определяется рядом их существенных преимуществ перед другими типами приводов и, прежде всего, возможностью получения больших усилий и мощностей при ограниченных размерах гидродвигателей. Гидроприводы обеспечивают широкий диапазон бесступенчатого регулирования скорости, возможность работы в динамических режимах с требуемым качеством переходных процессов, защиту системы от перегрузки и точный контроль действующих усилий.

В этой связи актуальной задачей для синтеза и исследования систем автоматического управления является разработка достоверных математических моделей рабочих процессов, протекающих в ЭГП и учитывающих особенности технологического назначения оборудования.

### Анализ последних исследований и публикаций.

Проблематика математического моделирования характеристик автоматических ЭГП машиностроительного оборудования достаточно широко представлена в литературе [1-6]. Исследование рабочих процессов в оборудовании основано на фундаментальных уравнениях гидромеханики, механики твердого тела, электротехники; а для исследования устойчивости и качества регулирования таких систем, для их корректирования применяют методы теории автоматического управления и регулирования.

При математическом моделировании динамических характеристик приводов машиностроительного оборудования возникают определенные трудности с описанием нестационарных гидромеханических процессов, протекающих в них. В динамике гидросистем имеются особенности, обусловленные взаимодействием гидравлических элементов, а также наличием движения рабочей среды по трубопроводам, щелям и каналам с местными сопротивлениями. Кроме процессов, возникающих при выполнении системами запланированных операций в гидроприводе, имеют место колебания давлений, расходов, отдельных деталей вследствие сжимаемости рабочей среды, воздействия рабочей среды на регулирующие устройства, утечки по зазорам и других причин. Сочетание всех этих явлений приводит к сложным нестационарным гидромеханическим процессам, которые необходимо учитывать при проектировании машиностроительного оборудования с гидроприводом.

Вместе с тем, расширение функциональных возможностей и повышение эффективности машиностроительного оборудования, в частности оборудования для механической обработки материалов, за счет разработки и применения систем автоматического управления требует негромоздких достоверных математических моделей рабочих процессов, протекающих в приводах и достаточно полно учитывающих особенности технологического назначения оборудования.

### Цель статьи

Целью данной работы является разработка математических моделей динамических характеристик автоматического электрогидравлического привода с объемным регулированием машиностроительного оборудования, а также структурных схем математических моделей оборудования с гидроприводом вращательного действия как объекта автоматического управления.

### Материалы и результаты исследования

Схемы и принцип работы автоматических ЭГП машиностроительного оборудования с объемным регулированием, в частности оборудования для механической обработки материалов с гидроприводом вращательного действия, обычно включают две аксиально-поршневые гидромашины: основной насос и гидромотор [1, 2, 5, 6]. Вал насоса приводится во вращение от асинхронного электродвигателя, а подача насоса регулируется изменением угла наклона блока цилиндров (или угла наклона шайбы).

При разработке схемных решений автоматических ЭГП машиностроительного оборудования для использования преимуществ объемного способа регулирования важным является правильный выбор системы управления подачи насоса. Анализ систем различного назначения показывает [5, 6], что применение электрогидравлических усилителей (ЭГУ) позволяет в полном объеме реализовать функциональные требования к оборудованию.

Аналоговые ЭГУ как самостоятельные устройства появились в связи с необходимостью создания высококачественных систем управления и нашли применение в отраслях промышленности, где новые технологии требовали качественно другого подхода к управлению процессами. ЭГУ являются связующим звеном между маломощными электрическими управляющими устройствами и силовыми гидравлическими механизмами. Кроме того, ЭГУ дают возможность применять ЭВМ для управления специальным технологическим оборудованием.

Гидроусилители по сравнению с другими типами усилителей, например электромеханическими, обладают рядом

преимуществ: лучшими динамическими свойствами, большей надежностью, простотой конструкции и очень высокими коэффициентами усиления по мощности (свыше  $3 \cdot 10^6$ ). Достаточно отметить, что отношение массы к мощности гидроусилителя достигает  $0,04 \text{ кг/кВт}$ , в то время как в электромеханических усилителях этот показатель примерно  $20 \text{ кг/кВт}$ , а магнитных — до  $70 \text{ кг/кВт}$ .

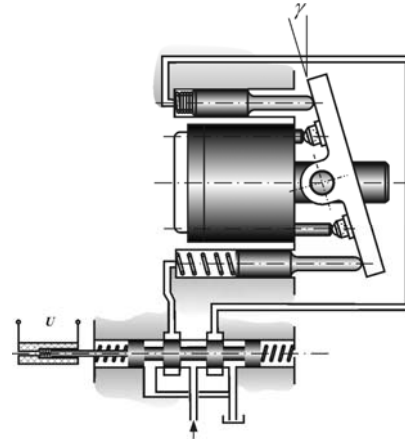


Рис. 1. Управление углом наклона шайбы аксиально-поршневого насоса

ЭГУ можно использовать практически с любым типом объемной гидравлической машины. В машиностроении достаточно широко распространены аксиально-поршневые машины, которые обладают хорошими весовыми характеристиками (при равной мощности они в 2-3 раза легче машин других типов), быстродействием и др. [5, 6].

Схема регулирования угла наклона шайбы аксиально-поршневого насоса ЭГУ представлена на рис. 1. Здесь использован однокаскадный ЭГУ, у которого шток пропорционального электромагнита связан непосредственно с золотником управляющего дросселирующего гидрораспределителя. Четырехщелевой дросселирующий гидрораспределитель подает жидкость к плунжерам, которые и перемещают наклонную шайбу аксиально-поршневого насоса.

Регулируемые аксиально-поршневые насосы с наклонной шайбой, чаще всего, в номенклатуре серийно выпускаемой гидроаппаратуры представлены как гидроагрегаты со встроенным ЭГУ [5, 6]. С использованием паспортных данных допустимо построить динамическую модель второго порядка процесса регулирования угла наклона шайбы насоса  $\gamma$  по управляющему напряжению  $U$

$$T_{2\gamma}^2 \frac{d^2\gamma}{dt^2} + T_{1\gamma} \frac{d\gamma}{dt} + \gamma = k_{\gamma U} U, \quad (1)$$

где  $k_{\gamma U}$  — коэффициент передачи, который можно определить по номинальному управляющему напряжению  $U_{ном}$  и номинальному углу наклона шайбы аксиально-поршневого насоса  $\gamma_{ном}$

$$k_{\gamma U} = \frac{\gamma_{ном}}{Q_{ном}} \quad (2)$$

Постоянные времени  $T_{2y}$ ,  $T_{1y}$  известным образом определяются по частотам  $V_1, V_2$  сдвига по фазе соответственно на  $-45^\circ$  и  $-90^\circ$  [4, 6]:

$$T_{2y} = \frac{1}{2\pi V_2}; T_{1y} = \frac{1}{2\pi V_1} - \frac{2\pi V_1}{(2\pi V_2)^2} \quad (3)$$

Данный подход к построению динамической модели автоматического управления углом наклона шайбы аксиально-поршневого насоса вполне применим и в случае использования ЭГУ как самостоятельного устройства, которые в номенклатуре серийно выпускаемой гидроаппаратуры представлены как дросселирующие гидрораспределители или распределители с пропорциональным управлением [5, 6].

Следует отметить, что регулирование подачи насоса может осуществляться не только изменением угла наклона шайбы, а и другими способами, например, изменением угла наклона блока цилиндров. Нетрудно убедиться, что и в данном случае динамическая модель процесса регулирования угла наклона люльки блока цилиндров будет иметь подобный вид.

Таким образом, передаточная функция процесса регулирования угла наклона шайбы (блока цилиндров) в соответствии с (1) имеет вид

$$W_{np}(s) = \frac{k_{\gamma U}}{T_{2y}^2 s^2 + T_{1y} s + 1} \quad (4)$$

где  $s$  - переменная Лапласа.

Как показали дальнейшие экспериментальные исследования, а также анализ характеристик ЭГУ, используемых в регулируемых насосах, передаточную функцию процесса регулирования рабочего объема насоса можно рассматривать как апериодическое звено первого порядка

$$W_{np}(s) = \frac{k_{\gamma U}}{T_{np} s + 1} \quad (5)$$

где  $T_{np}$  - постоянная времени процесса регулирования

$$T_{np} = \frac{1}{2\pi V_1} \quad (6)$$

В работах авторов [7, 8] получена передаточная функция силовой части ЭПП с объемным регулированием для угла поворота вала гидромотора  $\alpha$  по углу наклона блока цилиндров (или шайбы)  $\gamma$

$$W_{\alpha\gamma}(s) = \frac{\alpha(s)}{\gamma(s)} = \frac{1}{T_{cn} s (T_m^2 s^2 + 2\zeta_m T_m s + 1)} \quad (7)$$

где  $T_{cn}$  - постоянная времени гидропривода;

$T_m$  - постоянная времени гидромотора;

$\zeta_m$  - коэффициент относительного демпфирования гидромотора.

Для построения математической модели ЭПП с объемным регулированием как объекта автоматического управления передаточную функцию для угла поворота вала по углу наклона шайбы (блока цилиндров) привода (7) перепишем в виде

$$W_{\alpha\gamma}(s) = \frac{\alpha(s)}{\gamma(s)} = \frac{\alpha(s)\Omega(s)}{\Omega(s)\gamma(s)} = \frac{1}{s} W_{cn}(s) = \frac{k_{\Omega\gamma}}{s(T_m^2 s^2 + 2\zeta_m T_m s + 1)} \quad (8)$$

где  $W_{cn}(s)$  - введенная в рассмотрение передаточная функция силовой части привода (передаточная функция для угловой скорости вращения вала гидромотора по углу наклона шайбы или блока цилиндров)

$$W_{cn}(s) = \frac{\Omega(s)}{\gamma(s)} = \frac{k_{\Omega\gamma}}{T_m^2 s^2 + 2\zeta_m T_m s + 1} \quad (9)$$

где  $k_{\Omega\gamma}$  - коэффициент передачи силовой привода, который в соответствии с [1, 2] можно определить по выражению

$$k_{\Omega\gamma} = \frac{2\pi k_{Q\gamma}}{q_m} \quad (10)$$

Необходимо отметить следующее. Угловая скорость вращения вала гидромотора, в общем случае, определяется не только рабочим объемом насоса, но и величиной нагружающего момента  $M$  на валу мотора. Степень влияние устанавливается для конкретного привода, причем, увеличение нагружающего момента однозначно приводит к уменьшению угловой скорости вращения, что в линейном приближении может быть отражено передаточной функцией

$$W_{\Omega M}(s) = \frac{\Omega(s)}{M(s)} = -k_{\Omega M} \quad (11)$$

где  $k_{\Omega M}$  - коэффициент передачи для угловой скорости вращения по нагружающему моменту, величина которого можно оценить по статическим характеристикам объемного гидравлического привода [5, 6].

Таким образом, учитывая принцип суперпозиции

$$\Omega(s) = W_{cn}(s)\gamma(s) + W_{\Omega M}(s)M(s) \quad (12)$$

Математическую модель машиностроительного оборудования с гидроприводом вращательного действия как объекта автоматического управления можно представить структурной схемой, приведенной на рис. 2.

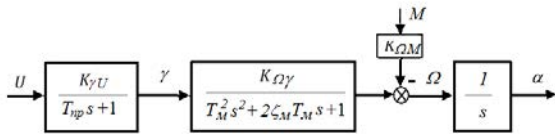


Рис. 2. Структурная схема математической модели ЭГП как объекта автоматического управления

Расчет динамических характеристик ЭГП с объемным регулированием с использованием специально разработанного программного обеспечения в среде пакета прикладных программ *Matlab* показал, что в большинстве случаев для реальных приводов оборудования для механической обработки материалов передаточную функцию силовой части привода (9) допустимо упрощенно рассматривать как аperiodическое звено первого порядка

$$W_{cn}(s) = \frac{k_{\Omega\gamma}}{T_{cn}s + 1}, \quad (13)$$

где  $T_{cn}$  - постоянная времени силовой части привода, значение которой можно определить согласно теоретических зависимостей, а также на основе экспериментальной оценки динамических характеристик привода [2, 9].

В этом случае упрощенную математическую модель оборудования с гидроприводом вращательного действия как объекта автоматического управления можно представить структурной схемой, приведенной на рис. 3.

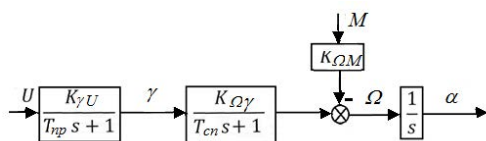


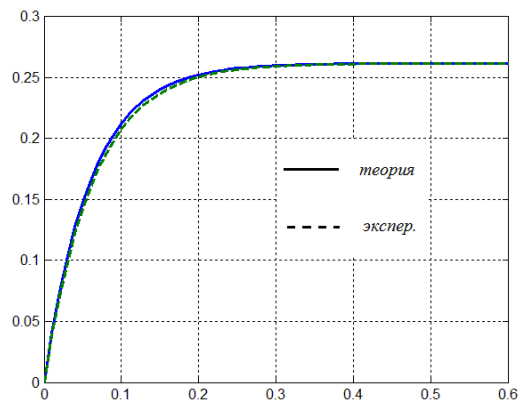
Рис. 3. Структурная схема упрощенной математической модели

Для проверки адекватности полученных математических моделей разработан автоматизированный стенд экспериментальных исследований и методика обработки опытных данных [9, 10] (на стенде использован насос типа *НАС 0,04/20* с максимальным рабочим объемом 0,04 л и гидромотор *М* типа *ПМ № 2,5 А* с рабочим объемом 0,0317 л).

На рис. 4, 5 сопоставлены опытные и расчетные переходные процессы для блока регулирования насоса при подаче управляющего

напряжения и привода в целом при изменении управляющего сигнала. Следует отметить, что расчетные значения переходного процесса для привода в целом (рис. 5) совпадали с точностью графического построения для полной и упрощенной математических моделей. Экспериментальные значения критерия Фишера (менее 1,2) не превышали табличных значений  $\approx 1,8$  при доверительной вероятности  $\alpha = 0,95$ . Поэтому разработанные модели динамических характеристик можно считать адекватными и положить в основу дальнейших исследований по синтезу системы автоматического управления оборудованием для механической обработки материалов.

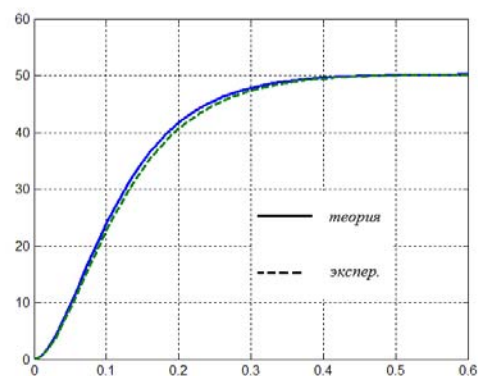
$\Delta\gamma$ ,  
рад



$t, c$

Рис. 4. Переходной процесс для блока регулирования насоса (изменение угла наклона шайбы  $\Delta\gamma$ , рад при подаче управляющего напряжения)

$\Omega, рад/с$



$t, c$

Рис. 5. Переходной процесс для привода в целом

## Выводы

Таким образом, разработаны математические модели динамических характеристик автоматического электрогидравлического привода с

объемным регулированием машиностроительного оборудования, представлены структурные схемы математических моделей оборудования с гидроприводом вращательного действия как объекта автоматического управления. Адекватность математических моделей процесса регулирования рабочего объема насоса, а также привода в целом подтверждена экспериментально.

Математические модели машиностроительного оборудования с гидроприводом вращательного действия как объекта автоматического управления положена в основу дальнейших исследований по синтезу системы автоматического управления оборудованием.

### Л и т е р а т у р а

1. Попов Д.Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем. – М.: Машиностроение, 1987. – 464 с.
2. Соколова Я.В. Совершенствование электрогидравлических приводов машиностроительного оборудования: монография / Я.В. Соколова, Н.Г. Азаренко, Д.С. Грешной. – Луганск: ВНУ им. В. Даля. – 2014. – 100 с.
3. Попов Д.Н. Нестационарные гидромеханические процессы. – М.: Машиностроение, 1982. – 240 с.
4. Соколова Я.В. Моделирование автоматических электрогидравлических приводов специального технологического оборудования: монография / Я.В. Соколова, Т.Я. Таванюк. – Донецк: Ноулидж. – 2013. – 52 с.
5. Свешников В.К., Усов А.А. Станочные гидроприводы: справочник. – М.: Машиностроение, 1988. – 512 с.
6. Навроцкий К.Л. Теория и проектирование гидро- и пневмоприводов. – М.: Машиностроение, 1991. – 384 с.
7. Sokolov V. Simulation of the power unit of the automatic electrohydraulic drive with volume regulation / V. Sokolov, N. Azarenko, Ya. Sokolova // ТЕКА Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. – Vol. 12. – N 4. – 2012. - Lublin, Poland. - pp. 268 - 273.
8. Соколов В.И. Моделирование силовой части автоматического электрогидравлического привода с объемным регулированием / В.И. Соколов, Н.Г. Азаренко, Я.В. Соколова // Вісн. Східноукр. націон. ун-ту ім. В. Даля. – 2012. - № 12 (183). - Ч.1. – С. 260 - 270.
9. Соколова Я.В. Экспериментальное исследование эффективности регулирования скорости выходного звена объемного гидропривода / Я.В. Соколова, Н.Г. Азаренко, Н.В. Ивин // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: зб. наук. праць. - Луганськ: СНУ ім. В. Даля. - 2013. - № 1(14). - С. 293 – 301.
10. Азаренко Н.Г. Экспериментальный стенд для исследования статических и динамических характеристик автоматических электрогидравлических приводов / Н.Г. Азаренко // Вісн. Східноукр. націон. ун-ту ім. В. Даля. – 2013. - № 3 (192). - Ч.1. – С. 5 - 9.

### References

1. Popov D.N. Dinamika i regulirovanie gidro- i pnevmosistem. – M.: Mashinostroenie, 1987. – 464 s.
2. Sokolova Ya.V. Sovershenstvovanie jelektrogidravlicheskih privodov mashinostroitelnogo oborudovanija: monografija / Ja.V. Sokolova, N.G. Azarenko, D.S. Greshnoj. – Lugansk: VNU im. V. Dalja. – 2014. – 100 s.
3. Popov D.N. Nestacionarnye gidromehaničeskie processy. – M.: Mashinostroenie, 1982. – 240 s.
4. Sokolova Ja.V. Modelirovanie avtomatičeskih jelektrogidravlicheskih privodov special'nogo tehnologičeskogo oborudovanija: monografija / Ja.V. Sokolova, T.Ja. Tavanjuk. – Doneck: Noulidzh. – 2013. – 52 s.
5. Sveshnikov V.K., Usov A.A. Stanochnye gidroprivody: spravochnik. – M.: Mashinostroenie, 1988. – 512 s.
6. Navrockij K.L. Teorija i proektirovanie gidro- i pnevmoprivodov. – M.: Mashinostroenie, 1991. – 384 s.
7. Sokolov V. Simulation of the power unit of the automatic electrohydraulic drive with volume regulation / V. Sokolov, N. Azarenko, Ya. Sokolova // ТЕКА Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. – Vol. 12. – N 4. – 2012. - Lublin, Poland. - pp. 268 - 273.
8. Sokolov V.I. Modelirovanie silovoj chasti avtomatičeskogo jelektrogidravličeskogo privoda s ob'emnym regulirovaniem / V.I. Sokolov, N.G. Azarenko, Ja.V. Sokolova // Visn. Shidnoukr. nacion. un-tu im. V. Dalja. – 2012. - № 12 (183). - Ch.1. – S. 260 - 270.
9. Sokolova Ja.V. Jeksperimental'noe issledovanie jeffektivnosti regulirovanija skorosti vyhodnogo zvena ob'emnogo gidroprivoda / Ja.V. Sokolova, N.G. Azarenko, N.V. Ivin // Resursozberigajuchi tehnologii virobničtva ta obrobki tiskom materialiv u mashinobuduvanni: zb. nauk. prac'. - Lugansk: SNU im. V. Dalja. - 2013. - № 1(14). - S. 293 – 301.
10. Azarenko N.G. Jeksperimental'nyj stend dlja issledovanija statičeskih i dinamičeskih harakteristik avtomatičeskih jelektrogidravlicheskih privodov / N.G. Azarenko // Visn. Shidnoukr. nacion. un-tu im. V. Dalja. – 2013. - № 3 (192). - Ch.1. – S. 5 - 9.

**Соколова Я.В., Рассказова Ю.Б. Моделирование динамических характеристик автоматического гидравлического привода машинобудівного устаткування**  
*Запропоновано математичні моделі динамічних характеристик автоматичного електрогидравлічного привода з об'ємним регулюванням машинобудівного устаткування. Представлені структурні схеми математичних моделей устаткування з гідроприводом оберальної дії як об'єкта автоматичного управління. Виконано експериментальну перевірку адекватності розроблених математичних моделей.*

**Ключові слова:** насос, гідромотор, об'ємне регулювання, передавальна функція, структурна схема, перехідний процес.

**Sokolova Ya.V., Rasskazova Yu.B. Modeling of dynamic characteristics of automatic electrohydraulic drive of machine building equipment.**

*Mathematical models of dynamic characteristics of machine-building equipment automatic electro-hydraulic drive with variable displacement are offered. Block diagram*

*of mathematical models of rotary action hydraulic drive equipment as an object of automatic control are shown. Adequacy experimental verification of developed mathematical models is done.*

**Keywords:** *pump, hydraulic motor, volume control, transmission function, block diagram, transition process.*

**Соколова Яна Володимирівна.** – к.т.н., доцент, докторант Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля  
**Рассказова Ю.Б.** – інженер кафедри машинобудування, верстатів та інструментів Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля

*Рецензент:* **Осенін Ю.І.**, д.т.н., проф.

Стаття подана 13.11.2015

УДК 621.646-62-82

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО СЛЕДЯЩЕГО ПРИВОДА

Таванюк Т.Я.

### EXPERIMENTAL STUDY OF THE ELECTRO-HYDRAULIC SERVO DRIVE

Tavanuk T.Ya.

*Представлены автоматизированный стенд экспериментальных исследований динамических характеристик следящего привода, методики проведения эксперимента и проверки адекватности математических моделей динамических характеристик электрогидравлических следящих приводов. Проверка выполняется по критериям Стьюдента и Фишера.*

**Ключевые слова:** следящий привод, динамические характеристики, математическая модель.

**Введение.** Проектирование высокотехнологического оборудования требует разработки адекватных математических моделей рабочих процессов, протекающих в них. В общем случае характеристики рабочих процессов являются нестационарными или периодически изменяются во времени.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Проверка адекватности математических моделей, как правило, осуществляется сопоставлением расчётных и экспериментальных характеристик (величин, зависимостей), степень расхождения которых должна удовлетворять определённым критериям [1, 3].

Проведение динамических испытаний является более трудоёмким процессом, чем статических, и получение достоверных сведений о динамических свойствах является более сложной задачей. Это связано с корректным выбором испытательного сигнала, его реализацией при проведении эксперимента, оценкой динамической погрешности измерений [1, 2] и т.д. В полной мере отмеченные трудности относятся к исследованию динамических характеристик электрогидравлических следящих приводов технологического оборудования.

Цель статьи. В данной работе разработаны автоматизированный стенд, методика проведения экспериментальных исследований и проверки адекватности математических моделей динамических характеристик электрогидравлических следящих приводов.

**Материалы и результаты исследования.** Автоматизированный стенд экспериментальных исследований (АСЭИ) состоит из следующих основных узлов:

1. Электрогидравлического усилителя (ЭГУ), объединяющего электромеханический преобразователь (ЭМП), гидравлический усилитель (ГУ), распределительный и блокирующий золотники.

2. Гидравлического исполнительного органа, выполненного в виде гидроцилиндра с кривошипно-шатунным механизмом.

3. Устройства маслоснабжения, состоящего из электродвигателя, пластинчатого насоса, сетчатого фильтра, маслобака.

4. Механизма местного ручного управления, включающего приводной винт со штурвалом, рукоятку переключателя, указатели положения, вал с кулачками.

5. Электрического датчика обратной связи дифференциально-трансформаторного типа с выпрямителем.

6. Контрольно-регулирующих устройств (манометр, дроссели, предохранительные клапаны, реле давления).

Все узлы собраны на плите, установленной на маслобаке, который одновременно является несущей конструкцией. Давление питания не менее 2 МПа, максимальный рабочий угол порота 90°, пределы изменения величины напряжения управления 0...48 В, рабочая жидкость- масло «индустриальное 20» или «турбинное 22».

Привод может работать в режимах автоматического, дистанционного и местного ручного управления.

При автоматическом или дистанционном управлении на вход АСЭИ (ЭМП 26, рис. 1) от электронного регулирующего блока (ЭРБ) подается аналоговый сигнал в виде двух напряжений постоянного тока. При появлении сигнала небаланса (входные напряжения на катушках различны) сердечник под действием разности

электромагнитных сил переместится. Величина перемещения сердечника 25 пропорциональна сигналу небаланса, а направление перемещения определяется знаком этого сигнала. Сердечник 25 ЭМП жестко связан с управляющей иглой 22 гидравлического усилителя мощности.

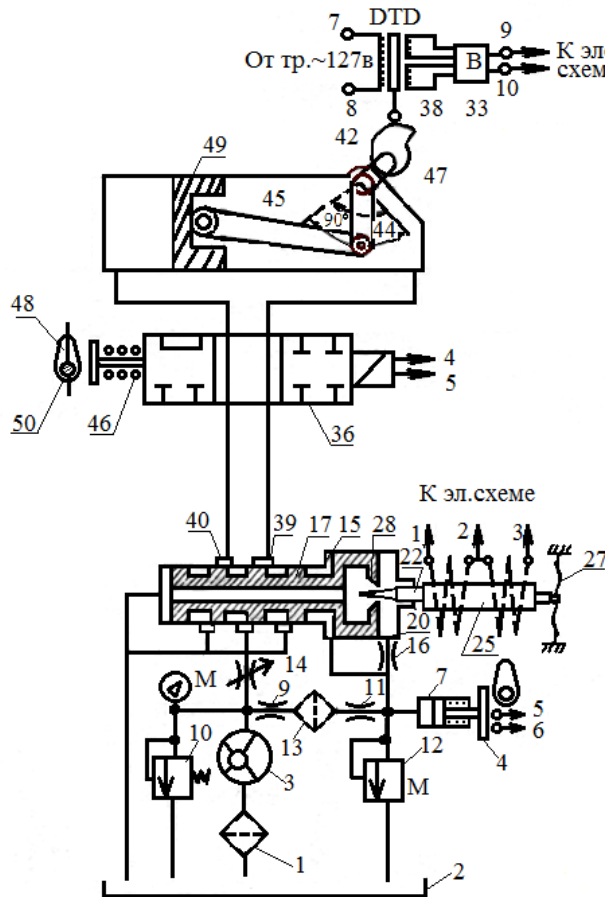


Рис. 1. Гидравлическая схема АСЭИ

При перемещении управляющей иглы изменяется зазор и потери в нем, а следовательно, и давление в камере 20. Нарушается равновесие, и золотник 17 тоже перемещается до нового положения равновесия. Причем, величина и направление смещения золотника 17 точно такие же, как и иглы 22, т.е. золотник следит за движением иглы.

При отсутствии сигнала небаланса на ЭМП сердечник 25 и игла 22 занимают среднее положение равновесия, при котором золотник 17 перекрывает каналы 39 и 40, ведущие исполнительного механизма 51. Поршень 49 неподвижен. При появлении сигнала небаланса на ЭМП золотник 17 смещается и масло под давлением поступает в одну из полостей гидроцилиндра 51, а с другой сливается в бак. Поршень приходит в движение. Скорость его движения зависит от величины смещения золотника 17, степени открытия дросселя 14 и давления после насоса, устанавливаемого и поддерживаемого переливным

клапаном 10 (он же предохранительный клапан всей системы). Для контроля давления в гидросистеме служит манометр М. Движение поршня через шатун 45 и кривошип 44 передается на вал 47, а через рычаг 41 на регулирующий орган.

Таким образом, осуществляется преобразование входного электрического сигнала в механическое воздействие привода на регулирующий орган при значительном усилении мощности.

Питание электромагнита осуществляется через микровыключатель МВ, переключение контактов 5 и 6 которого производится с помощью реле давления 7.

Для подачи в ЭРБ электрического сигнала обратной связи, служит дифференциально-трансформаторный датчик (ДТД) 35 с выпрямителем 33 (рис. 1). Сигнал датчика в пределах  $\pm 12 В$  используется в ЭРБ для формирования закона регулирования, а также для подачи информации оператору о положении выходного рычага 41, а следовательно и регулирующего органа.

В АСЭИ управление приводом осуществляется дистанционно от специального электронного регулирующего блока ЭРБ, состоящего из блока питания, задатчика и усилителя. Таким образом, гидравлический привод будет обрабатывать входной электрический сигнал. Величина угла поворота выходного рычага 41 привода, направление его вращения и время движения (время обработки сигнала) определяются, во-первых, величиной и знаком сигнала управления и, во-вторых, конструктивными и динамическими данными привода и объекта регулирования.

АСЭИ предусматривает возможность получения статических характеристик, частотных (амплитудной частотной и фазовой частотной) и переходной характеристик ЭГСП. Для этого АСЭИ включает генератор входных испытательных сигналов, подаваемых на вход ЭРБ, и регистрирующую аппаратуру - лучевой И-6 и шлейфовый Н-700 осциллографа.

Таким образом, экспериментальная установка и контрольно-измерительная аппаратура позволяет создавать переменные входные испытательные сигналы и регистрировать динамические характеристики ЭГСП.

Наиболее вероятное среднее арифметическое значение

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n},$$

где  $n$  – число параллельных опытов (не менее пяти);  $x_i$  – значение измеряемой величины в  $i$ -ом опыте.

Среднеквадратичное отклонение результатов измерений

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

Обнаружение грубой погрешности осуществлялось при помощи критерия Граббса

$$t_2 = \frac{|x_n - \bar{x}|}{S_n},$$

где  $x_n$  – проверяемое значение.

Если значение критерия Граббса больше табличного [5], то измерение отбрасывалось и повторно вычислялись  $\bar{x}$  и  $S_n$ .

Число параллельных опытов невелико, поэтому случайная ошибка

$$\Delta x_c = \frac{t_n S_n}{\sqrt{n}},$$

где  $S_n$  - критерий Стьюдента при числе опытов  $n$  и доверительной вероятности  $\alpha$  (доверительная вероятность принималась, равной 0,95).

Суммарная ошибка  $\Delta x$  находилась в зависимости от случайной и систематической

$$\Delta x = \sqrt{\left(\frac{t_n S_n}{\sqrt{n}}\right)^2 + \left(\frac{\delta}{3}\right)^2},$$

где  $t_\infty$  - значение критерия Стьюдента при  $n \rightarrow \infty$ ;

$\delta$  - систематическая погрешность прибора.

В большинстве случаев измеряется не непосредственно интересующая нас величина, а другая, зависящая от нее тем или иным образом. Такие измерения называются косвенными (в отличие от прямых, при которых определяемая величина измеряется непосредственно). К ним в наших опытах относились, в частности, статические характеристики элементов и устройств ЭГСП. В общем случае непосредственно измеряемые величины  $x_1, x_2, \dots, x_k$  будем считать аргументами, косвенно измеряемую величину функцией

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k).$$

Среднее значение косвенно измеряемой величины находим как

$$y = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_k),$$

где  $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_k$  – среднеарифметические значения непосредственно измеряемых величин.

Учитывая, что погрешности непосредственно измеряемых величин взаимнонезависимы и малы по сравнению с измеряемыми величинами, разложим функцию  $f(x_i)$  в ряд Тейлора. Ограничившись первым членом ряда и, используя закон сложения случайных погрешностей, можно получить выражение для определения величины доверительного интервала погрешности косвенно измеряемой величины

$$\Delta y = \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i\right)^2},$$

где  $\frac{\partial f}{\partial x_i}$  – частные производные по всем  $k$

переменным  $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_k$ .

Подразумевается, что доверительная вероятность для доверительных интервалов погрешностей измерений одна и та же, поэтому доверительная вероятность доверительного интервала погрешности косвенного измерения также равна  $\alpha$ .

Граница относительной погрешности косвенного измерения

$$\Delta \bar{y} = \frac{\Delta y}{y} = \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\frac{1}{f} \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i\right)^2}.$$

Так как  $\frac{1}{f} \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i = \frac{\partial}{\partial x_i} \ln f \Delta x_i$ , то

$$\begin{aligned} \Delta \bar{y} &= \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\frac{\partial}{\partial x_i} \ln f \Delta x_i\right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{\partial}{\partial x_1} \ln f \Delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial x_2} \ln f \Delta x_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial}{\partial x_k} \ln f \Delta x_k\right)^2} \end{aligned}$$

Для проверки адекватности моделей выбран критерий Фишера [4]

$$F_e = \frac{S_{ad}^2}{S_e^2},$$

представляющий собой отношение двух дисперсий – воспроизводимости и адекватности.

Дисперсия воспроизводимости [4]

$$S_e^2 = \sum_{i=1}^n \frac{S_n^2}{n},$$

где  $S_{ni}^2$  – среднеквадратичное отклонение при измерении  $i$ -го результата.

Рассеяние экспериментальных точек относительно расчетных характеризуется остаточной дисперсией или дисперсией адекватности [5]

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (y_i - y_{pi})^2}{m - l - 1},$$

где  $y_{pi}$   $y_i$  – расчетные и экспериментальные значения;  $m$  – число сравниваемых значений;  $l$  – число коэффициентов, определенных по опытным данным.

Теоретическая зависимость полагается адекватной опытной, если полученное экспериментальное значение критерия Фишера  $F_e$  меньше табличного  $F_{табл}$ , выбираемого по числу степеней свободы числителя и знаменателя, а также доверительной вероятности  $\alpha$

$$F_e < F_{табл}.$$

С использованием представленной методики на АСЭИ проведена проверка адекватности математических моделей ЭГСП разработанных в работах [6, 7].

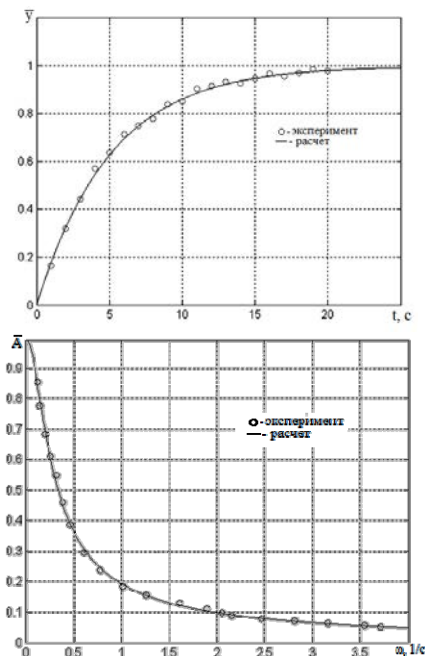


Рис. 2. Опытные данные и расчетная зависимость переходного процесса и амплитудной частотной характеристики

На рис. 2 представлены опытные данные и переходной процесс перемещения выходного звена ЭГСП. На рис. 4 сопоставлены опытные данные и безразмерная амплитудная частотная характеристика. Экспериментальные значения

критерия Фишера (менее 1,2) не превышали табличных значений. Поэтому разработанные модели динамических характеристик можно считать адекватными и положить в основу дальнейших исследований.

**Выводы.** Таким образом, разработан автоматизированный стенд и методика проведения экспериментальных исследований динамических характеристик. Проведена проверка адекватности математических моделей ЭГСП.

### Л и т е р а т у р а

1. Балакирев В.С. Экспериментальное определение динамических характеристик промышленных объектов управления/Балакирев В.С., Дудников В.Г., Цирлин А.М. – М.: Энергия, 1967. – 232 с.
2. Горский В.Г. Планирование промышленных экспериментов/ В. Горский, Ю. Адлер. – М.: Металлургия, 1974. – 264 с.
3. Алиев Т.А. Экспериментальный анализ/ Алиев Т.А. – М.: Машиностроение, 1991. – 272 с.
4. Кринецкий И.И. Основы научных исследований/ Кринецкий И.И. – К.: Вища шк., 1981. – 210 с.
5. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: Методы планирования эксперимента. – М.: Мир, 1980. – 612 с.
6. Соколова Я.В. Нелинейная математическая модель электрогидравлического следящего привода с дроссельным регулированием/ Соколова Я.В., Тванюк Т.Я., Соколов В.И. // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. – 2010. – № 10(152). – С. 168 – 175.
7. Андрийко А.А. Математическая модель электрогидравлического следящего привода с дроссельным регулированием/ Андрийко А.А., Таванюк Т.Я. // Збірник наукових праць студентів факультету приклад. механіки і матеріал. СХУ ім. В. Даля. – 2010. – С. 50 – 55.

### References

1. Balakirev V.S. JEksperimental'noe opre-delenie dinamicheskikh harakteristik promyshlennykh ob'ektov upravlenija/Balakirev V.S., Dudnikov V.G., Cirlin A.M. – М.: JEnergija, 1967. – 232 s.
2. Gorskij V.G. Planirovanie promyshlennykh jeksperimentov/ V. Gorskij, JU. Adler. – М.: Metallurgija, 1974. – 264 s.
3. Aliev T.A. JEksperimental'nyj analiz/ Aliev T.A. – М.: Mashinostroenie, 1991. – 272 s.
4. Krineckij I.I. Osnovy nauchnyh issledovanij/ Krineckij I.I. – К.: Vishha shk., 1981. – 210 s.
5. Dzhonson N., Lion F. Statistika i planirovanie jeksperimenta v tehnikе i nauke: Metody planirovanija jeksperimenta. – М.: Mir, 1980. – 612 s.
6. Sokolova JA.V. Nelinejnaja matematicheska model' jelektrogidravlicheskogo sledjashhego privoda s drossel'nym regulirovaniem/ Sokolo-va JA.V., Tvanjuk T.JA., Sokolov V.I. // Visnik Shid-noukraїns'kogo nacional'nogo universitetu im. Volodimira Dalja. – 2010. – № 10(152). – S. 168 – 175.
7. Andrijko A.A. Matematicheskaja model' jelektrogidravlicheskogo sledjashhego privoda s drossel'nym regulirovaniem/ Andrijko A.A., Tavanjuk T.JA. // Zbirnik naukovih prac' studentiv fakul'tetu priklad. mehaniki i material. SNU im. V. Dalja. – 2010. – S. 50 – 55.

**Таванюк Т.Я. Експериментальне дослідження електрогидравлічних слідкуючих приводів.**

*Подано автоматизований стенд експериментальних досліджень та методика перевірки адекватності, математичних моделей динамічних характеристик електрогидравлічних слідкуючих приводів.*

**Ключові слова:** *слідкуючий привід, динамічні характеристики, математична модель.*

**Tavanyuk T.Ya. Experimental study of the electro-hydraulic servo drive**

*Presented an automated booth experimental studies dynamic characteristics of the servo drive, the techniques of experiment and verify the adequacy of mathematical models of the dynamic characteristics of electro-hydraulic servo drives. The test is performed by Student's t test and Fisher*

*Fisher criterion experimental values <1.2 are not exceeded tabulated value at 1.9 confidence level). Is a graph comparing the experimental data, research and Analytical Data*

**Key words:** *servo drive, dynamic performance, a mathematical model.*

**Таванюк Тетяна Яківна** – к.т.н., доцент кафедри машинобудування, верстатів та інструментів Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля.

*Рецензент: Соколов В.І., д.т.н., професор*

Стаття подана 10.11.2015.

УДК 621.22.62-82

## КОРРЕКЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОМАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРИВОДА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Таванюк Т.Я., Соколова Я.В.

## CORRECTION OF DYNAMIC CHARACTERISTICS AUTOMATIC ELECTROHYDRAULIC ACTUATORS MACHINE BUILDING EQUIPMENT

Tavanyuk T.Ya., Sokolov Ya.V.

*Рассмотрены методы коррекции электрогидравлических приводов. Обосновано использование пропорционально-дифференциального регулятора для коррекции динамических характеристик электрогидравлического следящего привода оборудования для обработки давлением. Даны рекомендации по выбору рациональных параметров настройки корректирующего звена.*

**Ключевые слова:** динамические характеристики, корректирующее звено, передаточная функция, переходной процесс.

**Введение.** Современные требования к машиностроительному оборудованию, в частности, оборудованию для механической обработки материалов, предъявляют всевозрастающие требования к качеству регулирования автоматических приводов, а именно их быстрдействию и качеству переходного процесса. Стремление достигнуть высокой точности за счет увеличения коэффициента усиления разомкнутого контура привода (т.е. его добротности) дает появление недопустимой колебательности привода в переходном процессе.

В связи с этим появляется необходимость в изменении параметров или структуры привода. Для того чтобы обеспечить требуемый запас устойчивости, можно оценить возможность изменения конструкций элементов и устройств привода с целью уменьшения постоянных времени соответствующих им динамических звеньев. Существенная переделка агрегатов привода не всегда возможна, а иногда и не дает желаемого результата (если инерционная нагрузка на привод большая, а силы трения в исполнительном механизме незначительные). Поэтому выход из затруднительного положения находят при использовании дополнительных корректирующих устройств [1].

**1. Анализ последних исследований и публикаций.** Из большого числа корректирующих цепей в автоматических электрогидравлических

приводах машиностроительного оборудования преимущественно применяют отрицательные обратные связи. В некоторых случаях последняя охватывает только часть следящего привода, например, гидродвигатель и усилитель мощности, в других – почти весь. Дополнительный отрицательный сигнал поступает в сравнивающее устройство вместе с сигналом главной обратной связи. Конструктивное исполнение корректирующих устройств бывает различным, и в совокупности их можно разделить на две большие группы: гидромеханические и электрические [2,3].

Цель статьи. Целью данной работы является разработка рекомендаций по коррекции динамических характеристик автоматического электрогидравлического привода машиностроительного оборудования, выбору типового корректирующего звена для следящего привода оборудования для механической обработки материалов и его параметров настройки.

**2. Материалы и результаты исследования.** Используют следующие гидромеханические методы коррекции электрогидравлических следящих приводов (ЭГСП) с дроссельным регулированием:

1. Введение перетечки жидкости между полостями гидроцилиндра.

Известно, с увеличением утечек и перетечек в гидродвигателе колебательность следящего привода снижается. Вместе с тем постоянные повышенные утечки и перетечки снижают точность слежения в установившемся режиме работы следящего привода, поэтому применяют корректирующее устройство, работающее по принципу динамических перетечек жидкости. Оно создает перетечки жидкости при переходном процессе и прекращает их в установившемся режиме работы.

2. Обеспечение дополнительной обратной связи путем использования упругости опоры гидроцилиндра.

3. Подключение демпфера к золотнику.

4. Включение дополнительных обратных связей, создающих сигналы по производным от давления в полостях гидроцилиндра или по производным от перемещения его штока.

Общий подход при выборе корректирующего устройства вытекает из поставленной задачи: снизить колебательность, т.е. увеличить запас устойчивости ЭГСП при сохранении допустимой скоростной ошибки слежения. Дополнительная обратная связь не должна реагировать на установившуюся скорость следящего привода. Ее отрицательный сигнал должен быть пропорционален второй производной от перемещения выходного звена, т.е. его ускорению. Только в этом случае можно решить поставленную задачу.

При корректировании ЭГСП с дроссельным регулированием с помощью электрических устройств используют различные вспомогательные контуры, которые составлены из элементов, обладающих емкостью, индуктивностью и активным сопротивлением. Соединения из таких элементов позволяют получить динамические звенья с характеристиками, близкими к характеристикам форсирующих звеньев первого и второго порядков, или реальные дифференцирующие звенья [4]. Электрические корректирующие устройства могут быть включены последовательно в цепь управления электромеханическим преобразователем, а также могут быть применены для организации в основном контуре привода дополнительных обратных связей, создающих сигналы по производным от отдельных переменных величин по времени.

Методы корректирования, основанные на применении электрических устройств, достаточно просто осуществить. Они особенно целесообразны в тех случаях, когда необходимо исправить характеристики изготовленного привода или

привода, собираемого из готовых модулей. Однако электрические устройства не всегда обеспечивают требуемую надежность работы привода, и кроме того, они могут вызвать появление помех, искажающих формируемые в контуре привода сигналы управления. Отмеченные недостатки электрических корректирующих устройств в меньшей степени проявляются при использовании гидромеханических корректирующих устройств. Однако такие устройства обычно органически связаны с конструкцией ЭГУ или исполнительного гидродвигателя, и поэтому их применение должно быть предусмотрено при создании привода.

Исходя из вышеизложенного, для коррекции динамических свойств ЭГСП с дроссельным регулированием оборудования для обработки давлением следует рекомендовать последовательную установку в цепь электромеханического преобразователя ЭГУ корректирующего звена - пропорционально-дифференциального регулятора с передаточной функцией

$$W_k(s) = Ts + k, \tag{1}$$

где  $T$  – постоянная времени корректирующего звена;  $k$  – коэффициент передачи корректирующего звена.

Следует отметить, что корректирующее звено может быть выполнено как электрическое устройство или запрограммировано при использовании ЭВМ для управления ЭГСП и формирования главной обратной связи.

Для моделирования динамических характеристик ЭГСП с корректирующим звеном в среде *Simulink* пакета *MATLAB* разработана блок-диаграмма, которая представлена на рис. 1.

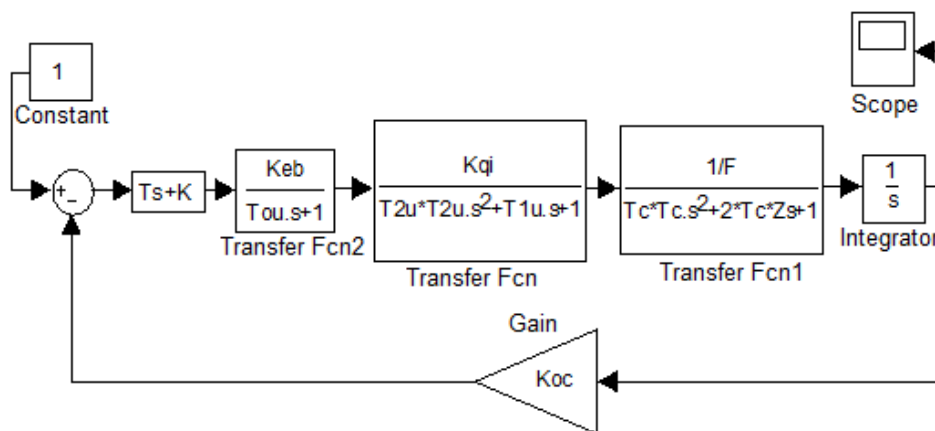


Рис. 1. Блок-диаграмма для моделирования динамических характеристик ЭГСП с корректирующим звеном в среде *Simulink* пакета *MATLAB*

На рис. 2 показано влияние постоянной времени  $T$  корректирующего звена на переходной процесс при коэффициенте передачи  $k=0$  (расчет выполнен для привода с максимальной нагрузкой 160 кН и скоростью слежения 0,05 м/с). Как видно, несмотря на то что переходной процесс перестает быть аperiodическим, он имеет все же монотонный характер. Это вполне допустимо для автоматического привода специального технологического оборудования, в частности, ЭГСП оборудования обработки давлением.

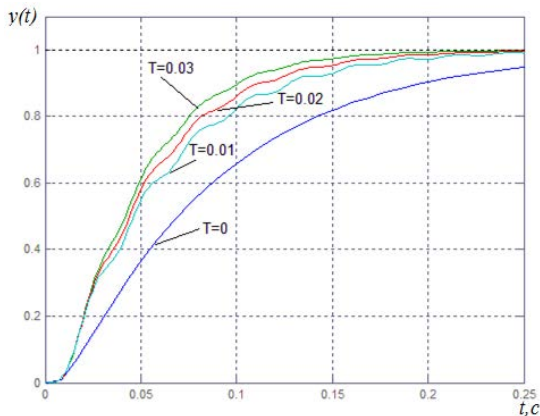


Рис. 2. Влияние на переходной процесс постоянной времени  $T$  корректирующего звена

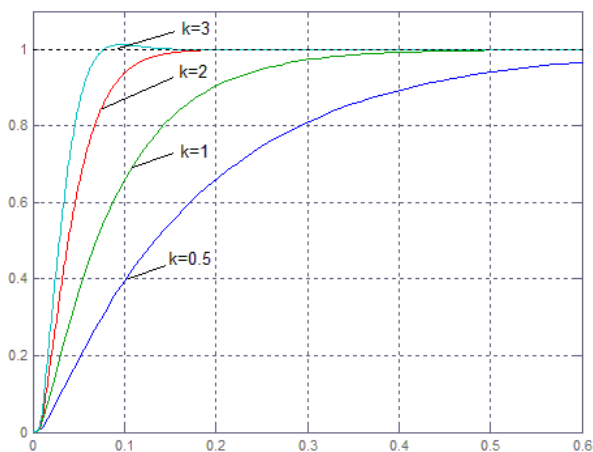


Рис. 3. Влияние на переходной процесс коэффициента передачи  $k$  корректирующего звена

Характер влияния на переходной процесс коэффициента передачи  $k$  корректирующего звена при постоянной времени  $T=0$  представлен на рис. 3 для тех же основных параметров привода.

Результаты моделирования влияния параметров корректирующего звена на качество регулирования показывают, что вопрос о выборе оптимальных параметров настройки должен решаться отдельно для конкретного привода. Для рассмотренного примера, в частности, следует рекомендовать значения постоянной времени  $T$  в

диапазоне 0,01...0,03 с и коэффициента передачи  $k$  в диапазоне 1...2, что позволяет повысить быстродействие привода более чем в 2 раза.

**Вывод.** Таким образом, на основании проведенных исследований обосновано использование пропорционально-дифференциального регулятора для коррекции динамических характеристик электрогидравлического следящего привода машиностроительного оборудования для механической обработки материалов, а также даны рекомендации по выбору рациональных параметров настройки корректирующего звена.

### Литература

1. Данилов Ю.А. Аппаратура объёмных гидроприводов: Рабочие процессы и характеристики / Ю.А. Данилов, Ю.Л. Кириловский, Ю.Г. Колпаков. - М.: Машиностроение, 1990. - 272с.
2. Гамынин Н.С. Гидравлический привод систем управления/ Н.С. Гамынин - М.: Машиностроение, 1972. - 230с.
3. А.М. Киринов Гидропневмопривод металлургических машин / А.М. Киринов, М.Л. Босняк – Новокузнецк: СибГИУ, 2008. - 84с.
4. Ермаков О.А. Выбор и расчет корректирующих цепей для электро-гидравлической следящей системы: уч. пос./ О.А. Ермаков - М.: МАДИ, 1985. - 350с.
5. Месропян А. В. Особенности коррекции электрогидравлических следящих приводов / А. В. Месропян // Вестник СГАУ им. С. П. Королева, 2009. - №1. - С. 134-144
6. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т.1. Линейные системы./ Д.П. Ким – М.: Физматлит, 2003. – 288 с.
7. И.В.Черных. Simulink: Среда создания инженерных приложений / И.В.Черных - "Диалог-МИФИ", Москва, 2004. - 491с.
8. Лазарев Ю. Моделирование процессов и систем в MATLAB./ Лазарев Ю. - СПб.: Изд. BHV, 2005. – 512 с.

### References

1. Danilov JU.A. Apparatura objomnyh gidroprivodov: Rabochie processy i harakteristiki / JU.A.Danilov, JU.L Kirilovskij, JU.G. Kolpakov. - M.: Mashinostroenie, 1990. - 272s.
2. Gamynin N.S. Gidravlicheskiy privod sistem upravlenija/ N.S. Gamynin - M.: Mashinostroenie, 1972. - 230s.
3. A.M. Kirnosov Gidropnevmoпривод metallurgicheskikh mashin / A.M. Kirnosov, M.L. Bosnjak – Novokuzneck: SibGIU, 2008. - 84s.
4. Ermakov O.A. Vybor i raschet korrektrirujshih cepej dlja jelektro-gidravlicheskoj sledjashhej sistemy: uch. pos./ O.A. Ermakov - M.: MADI, 1985. - 350s.
5. Mesropjan A.V. Osobennosti korrekcii jelektrogidravlicheskih sledjashhih privodov / A. V. Mesropjan // Vestnik CGAU im. S. P. Koroleva, 2009. - №1. - S. 134-144
6. Kim D.P. Teorija avtomaticheskogo upravlenija. T.1. Linejnye sistemy./ D.P. Kim – M.: Fizmatlit, 2003. – 288 s.
7. I.V.Chernyh. Simulink: Sreda sozdanija inzhenernyh prilozhenij / I.V.Chernyh -"Dialog-MIFI", Moskva, 2004. - 491s.

8. Lazarev JU. Modelirovanie processov i sistem v MATLAB./ Lazarev JU. - SPb.: Izd. BHV, 2005. - 512 s.

**Таванюк Т.Я., Соколова Я.В. Корекція динамічних характеристик автоматичного електрогідравлічного приводу машинобудівного устаткування.**

*Обґрунтовано використання пропорційно-диференційного регулятора для корекції динамічних характеристик електрогідравлічного сліdkуючого приводу устаткування для обробки тиском. Дані рекомендації що до вибору раціональних параметрів настроювання коригуючої ланки.*

**Ключові слова:** динамічні характеристики, коригуюча ланка, передавальна функція, перехідний процес.

**Tavanyuk T.Ya., Sokolova Ya.V. Correction of dynamic characteristics automatic electrohydraulic actuators machine building equipment**

*The automatic control system of special technology equipment with electrohydraulic drive development. The use the combined control system confirmed. Correction is carried out by direct parameter of quality control - changes*

*movement. Blok diagram of the observer reported. Model the effector the observer Kalman-Byusi on the quality regulation work processes drive perform in the program MATLAB. Improvement drive characteristic when using the filter got. The influence applying the filter on the quality control processes of drive and quality of the movement of the transition processes obtained.*

**Key words:** dynamic performance, corrective element, the transfer function, the transition process.

**Таванюк Тетяна Яківна** – к.т.н., доцент кафедри машинобудування, верстатів та інструментів Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля.

**Соколова Яна Володимирівна.** – к.т.н., доцент, докторант Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля

*Рецензент: Осенін Ю.І., д.т.н., проф.*

Стаття подана 10.11.2015.

УДК 621.9.06: 002:62:006.354

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЛЕКСА СТАНДАРТОВ ЕСКД В САПР КОМПАС

Хмельницький А.В., Кроль О.С.

### USING SET OF STANDARDS ESKD IN THE CAD KOMPAS

Khmelnitsky A.V., Krol O.S.

*Дана оценка возможностей системы автоматизированного проектирования КОМПАС при использовании комплекса стандартов ЕСКД. Рассмотрены приемы использования готовых шаблонов наиболее часто встречающихся элементов оформления листов различных документов, Приведены особенности применения стандартных процедур, применяемых в создании чертежей, в том числе стандартов по типам линий, а также по их толщине, простановки размеров, выбор качества из ряда стандартных и других процедур. Показано преимущества программ настройки процедур машинной графики на возможные изменения новых редакций ГОСТ и нормалей.*

**Ключевые слова:** стандарты ЕСКД, САПР КОМПАС, шаблоны документов, типы линий

**Введение.** В связи с интенсивным развитием компьютерной техники во всех сферах деятельности внедряются современные информационные технологии, электронный обмен информацией и документацией [1]. Этот процесс не мог не коснуться и конструкторской документации (КД). В производственной практике стало появляться все больше конструкторских документов в электронном виде. Электронная форма представления документации фактически стала непременным условием конкурентоспособности продукции.

Вместе с тем, эта форма КД до последнего времени не имела всестороннего нормативного обеспечения, т.е. требования, правила, нормы выполнения конструкторских документов в электронной форме не были стандартизованы.

Одним из важнейших требований, которые предъявляются к программным средствам САПР во многих проектных организациях, является возможность выполнения документов проекта в соответствии с требованиями стандартов ЕСКД [2].

В настоящее время проектирование выполняется преимущественно средствами САПР, операции ручной обработки вытесняются обработкой на программно-управляемых станках, фотошаблоны выполняются на программно-управляемых фотоплоттерах.

Вместе с тем, на производстве для изготовления и контроля любых изделий, для определения ответственности в случае брака и для разрешения спорных ситуаций требуются конструкторские документы по ЕСКД.

Для более эффективного взаимодействия автоматизированного режима проектирования введены в действие новые нормативные документы в составе ЕСКД, закрепляющие достижения информационных технологий в процессах проектирования и производства:

- ГОСТ 2.051 – 2006. Единая система конструкторской документации. Электронные документы. Общие положения;

- ГОСТ 2.052 – 2006. Единая система конструкторской документации. Электронная модель изделия. Общие положения;

- ГОСТ 2.053 – 2006. Единая система конструкторской документации. Электронная структура изделия. Общие положения.

Главное в этих нововведениях – юридическое закрепление следующих основных положений:

а) наличие двух форм КД – традиционной (бумажной) и электронной (безбумажной) с возможностью их параллельного существования;

равноправный статус этих двух форм документации и возможность их преобразования друг в друга;

б) ввод в ЕСКД новых сущностей и видов конструкторских документов и их определения на основе понятия электронной структуры изделия:

- электронная структура изделия (дерево состава изделия),

- электронная модель как обобщенное понятие (математическая, геометрическая, топологическая и т.п.),

- электронная модель детали и электронная модель сборочной единицы в качестве конструкторских документов;

- правила отображения этих новых документов в существующие виды традиционных КД;

- признание факта существования электронных документов, не отображаемых в традиционных

видах КД (3D-модели, аудиодокументы, видеоролики и т.п.).

Эффективность использования системы автоматизированного проектирования зависит от того объема изменений, которые необходимо внести в настройку программы и учете возможных новых редакций в системе стандартов ЕСКД.

**Целью данной работы** является повышение эффективности процесса конструирования за счет использования стандартов ЕСКД в системе КОМПАС

**Изложение основного материала.** Концепция электронной модели изделия предполагает использование программно-технических комплексов САПР, позволяющих строить цельную иерархическую модель сложного продукта, из которой должны извлекаться и в которую, наоборот, могут включаться модели составных частей. Каждая такая часть может быть продуктом специализированной САПР.

В наше время различные системы автоматизированного проектирования получили достаточно широкое распространение в машиностроении, строительстве и других отраслях [3, 4]. Существенное сокращение периода проектирования, быстрый запуск в производство, интегрирование с пакетами разработки управляющих программ для непосредственного изготовления деталей – эти качества способствуют внедрению САПР на современных предприятиях. Одно из направлений применения САПР – получение 2D чертежей и другой технической документации. При этом, достаточно важным аспектом применения современных САПР является соответствие требованиям ЕСКД полученных изображений видов изделий, а также получение полного пакета технической документации на создаваемый проект. Системы автоматизированного проектирования «КОМПАС» [5, 6, 7] позволяют получить желаемый результат, практически не внося каких-либо изменений в настройку программы, так как система изначально настроена на выполнение всех ГОСТ ЕСКД по умолчанию. Даже если происходит изменение какого-либо стандарта, очередная версия «КОМПАС» обязательно это учтет и внесет изменения в новую версию. Этот фактор нельзя не учитывать, так как обычно на предприятиях требуется оформление технической документации в соответствии с действующими ГОСТ.

Разработчик программы компания «Аскон» прямо говорит об этом, не забывая при этом указать на возможность настройки системы под собственные требования пользователя: «Изначально система ориентирована на оформления документации в соответствии с ЕСКД, ЕСТД, СПДС и международными стандартами, но этим возможности системы не ограничиваются.

Гибкость настройки системы и большое количество прикладных библиотек и приложений позволяют выполнить практически любую задачу пользователя, связанную с выпуском документации

для всех отраслей. А поддержка распространенных форматов (DXF, DWG, IGES и eDrawing) дает возможность организовывать эффективный обмен данными со смежными организациями и заказчиками, использующими любые чертёжно-графические системы».

Так что же дает «КОМПАС» своему потребителю в плане оформления технической документации? А ведь очень многое.

В первую очередь, это готовые шаблоны наиболее часто встречающихся элементов оформления листов различных документов (рис. 1). «КОМПАС» предоставляет полный комплект стандартных рамок чертежей, применяемых в машиностроении и строительстве, спецификации, ведомости, а также другие листы технической документации.

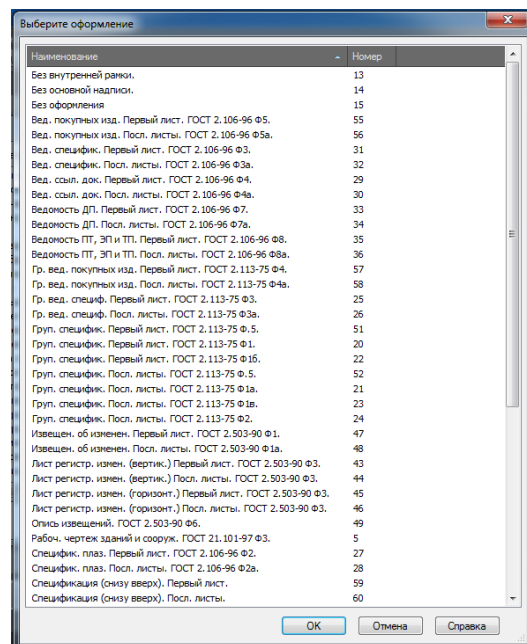


Рис. 1. Комплекты технической документации

Линии, используемые для черчения, представлены в широком многообразии. Учтены требования стандартов по типам линий, а также по их толщине при выводе документа в печать (рис. 2).

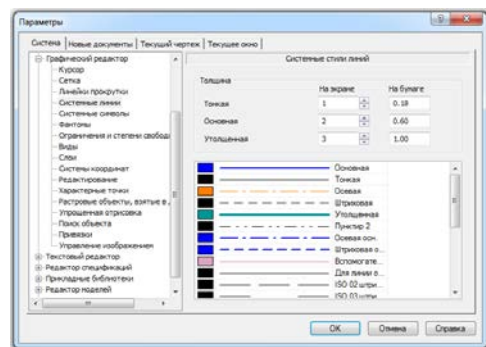


Рис. 2. Типы линий и их толщина

Размерные линии (рис. 3), линии – выноски, стрелки взгляда, обозначения позиций и другие подобные элементы оформления чертежей по умолчанию представлены в стандартном виде.

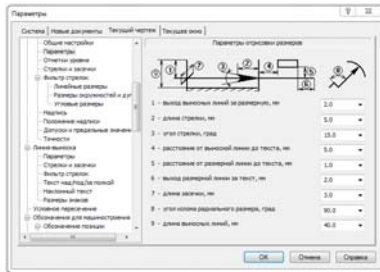


Рис. 3. Размерные линии

При простановке размеров пользователю предоставляется возможность выбрать качество из ряда стандартных, а также получить при этом соответствующую величину отклонений размеров (рис. 4).

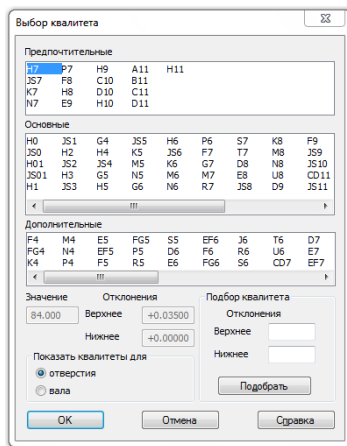


Рис. 4. Качества и отклонения

Неоспоримым преимуществом любой САПР будет наличие различных баз данных. В «КОМПАС» широко представлены библиотеки с готовыми стандартными изделиями, библиотеки обозначений, базы данных материалов (рис. 5) и т.п.

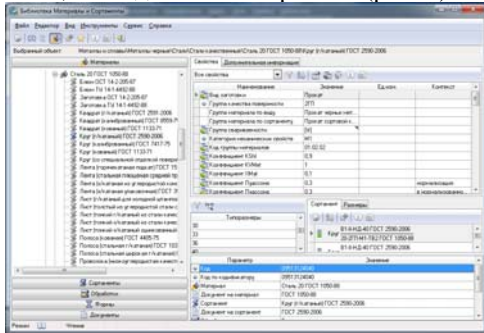


Рис. 5. Библиотеки готовых стандартных изделий

Также есть текстовые шаблоны, облегчающие написание технических требований, свойств материала и т. д. (рис. 6).

Указанные свойства «КОМПАС» позволяют получать графические документы, полностью соответствующие стандартам ЕСКД. Это дает неоспоримое преимущество перед другими САПР в плане оформления технической документации, что подтверждается отзывами пользователей, имеющих опыт работы в разных системах автоматизированного проектирования.

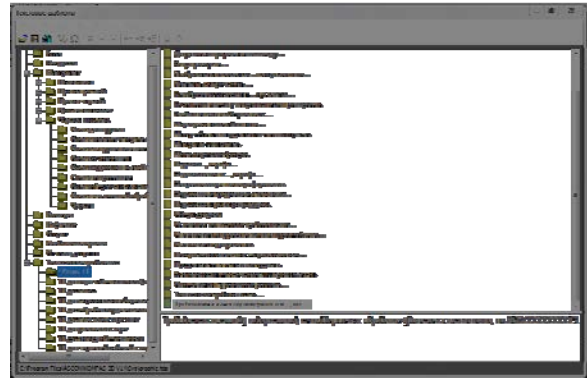


Рис. 6. Текстовые шаблоны

**Выводы.** 1. Дана оценка возможностей системы автоматизированного проектирования КОМПАС при использовании комплекса стандартов ЕСКД.

2. Показано преимущества программ настройки процедур машинной графики на возможные изменения новых редакций ГОСТ и нормалей.

3. Рассмотрены приемы внедрения текстовых шаблонов, облегчающих процедуру оформления чертежей.

### Литература

1. Кондрашина С. ЕСКД. Грядут большие перемены/С. Кондрашина. - САПР и графика 5, 2006. - С. 27-30.
2. Суходольский В. Формирование комплекта конструкторской документации по ЕСКД в тандеме САПР Altium Designer – AutoCAD/ В. Суходольский. - САПР и графика 8, 2011. - С. 12-21.
3. Ли К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE)/ К. Ли. - СПб: Питер, 2004. - 560 с.
4. T-FLEX CAD 7.0 - Российская САПР нового поколения на ядре Parasolid/ КомпьютерПресс, № 7, 2000. - с 31-37.
5. Ганин Н.В. Трехмерное проектирование в КОМПАС-3D/Н. В. Ганин. - М.: ДМК, 2012. - 776 с.
6. Ганин Н.В. Проектирование и прочностной расчет в системе КОМПАС-3D V.13/Н. В. Ганин. - М.: ДМК, 2011. - 320 с.
7. Кудрявцев Е.М. Металлоконструкции, редукторы, электродвигатели в КОМПАС-3D/ Е.М. Кудрявцев. - М.: ДМК, 2011. - 440 с.

### References

1. Kondrashina S. ESKD. Grjadut bol'shie peremeny/S. Kondrashina. - SAPR i grafika 5, 2006. - S. 27-30.

2. Suhodol'skij V. Formirovanie komplekta konstruktorskoj dokumentacii po ESKD v tandeme SAPR Altium Designer – AutoCAD/ V . Suhodol'skij . – SAPR i grafika 8, 2011. – S. 12-21.
3. Li K. Osnovy SAPR (CAD/CAM/CAE)/ K. Li. – SPb: Piter, 2004. – 560 s.
4. T-FLEX CAD 7.0 - Rossijskaja SAPR novogo pokolenija na jadre Parasolid/ Komp'juterPress, № 7, 2000. – s 31-37.
5. Ganin N.V. Trehmernoje proektirovanie v KOMPAS-3D/N. V. Ganin. – M.: DMK, 2012. – 776 s.
6. Ganin N.V. Proektirovanie i prochnostnoj raschet v sisteme KOMPAS-3D V.13/N. V. Ganin. – M.: DMK, 2011. – 320 s.
7. Kudrjavcev E.M. Metallokonstrukcii, reduktory, jelektrovigateli v KOMPAS-3D/ E.M. Kudrjavcev. – M.: DMK, 2011. – 440 s.

**Хмельницький А.В., Кріль О.С. Використання комплексу стандартів ЕСКД в САПР КОМПАС**

*Дана оцінка можливостей системи автоматизованого проектування КОМПАС при використанні комплексу стандартів ЕСКД. Розглянуто прийоми використання готових шаблонів найбільш часто зустрічаються елементів оформлення листів різних документів, Наведено особливості застосування стандартних процедур, застосовуваних у створенні креслень, у тому числі стандартів за типами ліній, а також по їх товщині, простановки розмірів, вибір якості з ряду стандартних та інших процедур . Показано переваги програм настройки процедур машинної графіки на можливі зміни нових редакцій ГОСТ і нормалей.*

**Ключові слова:** стандарти ЕСКД, САПР КОМПАС, шаблони документів, типи ліній

**Khmel'nitsky A.V., Krol O.S. Using set of standards ESKD IN THE CAD KOMPAS**

*The estimation of possibilities of computer aided design KOMPAS using a set of standards ESKD. We consider methods of using ready-made templates most common design elements of sheets of various documents. Showing limits of applicability of ready-made templates most common design elements of sheets of various documents, including a complete set of a standard framework of drawings used in engineering, specification sheets and other sheets of technical documentation. Peculiarities of application of standard procedures used in the creation of drawings, including standard types of lines, as well as on their thickness, dimensioning, choice of quality class of a number of standard and other procedures. Displaying the advantages of software configuration procedures, computer graphics for possible changes in new editions of the Standard and normal. There was a choice of a number of quality class standard, and thus obtain the corresponding deviations of sizes.*

**Keywords:** ESKD standards, CAD KOMPAS, document templates, types of lines

**Кріль Олег Семенович** – кандидат технічних наук, професор кафедри машинобудування, верстатів та інструментів Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, [krols@yandex.ru](mailto:krols@yandex.ru)  
**Хмельницький Андрій Валерійович** – студент кафедри машинобудування, верстатів та інструментів Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля.

*Рецензент:* **Соколов В.І.**, д.т.н., професор

Статья подана 23.10.2015.

УДК 502.1(075.8): 621.74

## ЕКОЛОГІЧНА СИТУАЦІЯ У МЕТАЛУРГІЙНОМУ ПЕРЕДІЛІ ЛИВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ ВИЛИВКІВ З ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВИХ СПЛАВІВ

Шалевська І.А.

### ECOLOGICAL SITUATION IN METALLURGIC REPARTITION PROCESS OF THE FOUNDRY INDUSTRY DURING IRON-OXIDE ALLOY CASTING

Shalevskaya I.A.

В статті розглянуто питання утворення викидів забруднюючих речовин від ливарних плавильних печей при плавленні залізовуглецевих сплавів, проведено аналіз хімічного складу відходячих газів, приведено питомі показники по викидам забруднюючих речовин, сформульовано рекомендації з покращення екологічної ситуації в металургійному переділі ливарного виробництва.

**Ключові слова:** викиди, забруднюючі речовини, плавильні агрегати, питомі показники, пил неорганічний, діоксид вуглецю.

**Постановка проблеми.** Однією з головних проблем ливарного виробництва по негативному впливу на здоров'я людини і стан навколишнього середовища залишається екологія, оскільки при виплавці ливарних сплавів і заливці ливарних форм виділяється значна кількість пилу, шкідливих газів і утворюються тверді промислові відходи.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Інтенсивні та небезпечні виділення утворюються в процесі плавлення металу і складають близько 40 – 50% усіх викидів і відходів, що утворюються в ливарному цеху. Викид забруднюючих речовин, хімічний склад пилу та відходячих газів при цьому різноманітний і залежить від типорозміру та конструкції плавильного агрегату, від складу металозавалки і ступеню її забруднення, а також від стану футеровки печі, технології плавки, вибору енергоносіїв [1].

Величина викидів пилу в атмосферу коливається від 0,3-0,4 кг/т виплавлюємого металу в індукційних печах до 10-18 кг/т під час плавлення в вагранці закритого типу з гарячим дуттям [2]. Окрім пилу при плавленні металу виділяється велика кількість газів, в основному це оксиди вуглецю (CO), оксиди азоту (NO) і сірчаний газ[3].

Під час плавлення 1 т металу в відкритих чавуноливарних вагранках виділяється 900-1200 м<sup>3</sup> колошникового газу, що містить оксиди вуглецю, сірки, азоту, пари мастил, полідисперсний пил та ін. Кількість викидів залежить від продуктивності вагранки, витрат дуття. Хімічний склад ваграночного пилу залежить від складу металозавалки, палива, умов праці вагранки і може коливатись в наступних межах (%): SiO<sub>2</sub> - 20-50%; CaO - 2-12%; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 0,5-4%; (FeO+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) - 10-36%; MnO - 0,5-2,5%; C - 30-45%.

**Метою статті** є проведення моніторингу екологічної ситуації у металургійному переділі ливарного виробництва при виготовленні виливків з залізовуглецевих сплавів.

**Матеріали та результати дослідження.** Питомі викиди забруднюючих речовин (кг/т) при плавленні чавуна у відкритих чавуноливарних вагранках та в електродугових печах продуктивністю 7 т/ч приведено в таблиці 1 [4].

Таблиця 1

Викиди забруднюючих речовин (кг/т) при плавленні чавуна

	Пил	Оксид вуглецю	Вуглеводороди	Оксиди азоту	Діоксид сірки
Відкрита вагранка	19	200	2,4	0,014	1,5
Електродугова піч	8,1	1,5	–	0,29	–

Таблиця 2

## Хімічний склад аерозолей з дугової електропечі при виробництві сталі

	Склад часток, масові долі (%)								
	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mn O	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
плавлення	9,77	3,39	0,45	66,75	0,31	10,15	1,32	2,08	0,60
Окислювання домішок	0,76	6,30	0,67	66,00	0,17	5,81	1,32	6,00	0,59
Продувка киснем	2,42	3,10	1,83	65,37	0,14	9,17	0,86	1,84	0,76
Обробка	Сліди	35,22	2,72	26,60	0,45	0,70	0,53	7,55	0,55

При цьому склад пилу при виплавці сталі залежить від марки сталі, що виплавляється, складу шихти та режиму плавки. Приблизний хімічний склад пилу (%): Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 56,8; CaO - 6,9; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 5,0; SiO<sub>2</sub> - 6,9; Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 10,0; MgO - 5,8; інше - хлориди, оксиди хрому і фосфору. Під час плавлення сталі в індукційних печах в порівнянні з електродувовими виділяється незначна кількість газів та в 5-6 разів менше пилу, за розміром більш крупного. Кількість газу та пилу, що утворюються при плавленні в індукційних печах, насамперед залежить від якості шихтових матеріалів. При виробництві сталі в дугових електричних печах до складу газів входить 5 - 70% CO, 5 -15% CO<sub>2</sub>, 0,5- 5% H<sub>2</sub>, 3 -10% O<sub>2</sub>, інше N<sub>2</sub> [5].

В таблиці 2 приведено хімічний аналіз аерозолей з дугової електропечі під час плавлення, окислення, продування киснем та відновленні при відсутності притискування викидів.

Утворення CO виникає в результаті реакції вуглецю електродів або вуглецю, що знаходиться у ванні з залізом, з оксидом заліза або киснем під час продування. Викиди CO змінюються в межах від 0,26 до 3,3 кг/т сталі.

Середні питомі показники по викиду забруднюючих речовин під час плавки сталі та чавуну в ливарних цехах підприємств м.Луганська за 2013 рік приведені в таблиці 3 [6].

Таблиця 3

## Середні питомі показники по викиду забруднюючих речовин

Найменування забруднюючої речовини	Викиди забруднюючих речовин при плавленні, кг/т	
	сталі	чавуну
Пил неорганічний з вмістом SiO <sub>2</sub> 20-70%	5,0	0,4
Диоксид азоту (NO <sub>2</sub> )	0,33	0,08
Сірки диоксид (SO <sub>2</sub> )	2,7	0,26
Оксид вуглецю (CO)	5,9	1,3

Кількість викидів пилу залежить від безлічі факторів і, як правило, при дотриманні технологічної дисципліни і застосуванні комплексу заходів по витяжці пилу і застосуванні систем

пилоприглушення процес керований. В першу чергу кількість викидів пилу залежить від шихти (ступінь її чистоти і підготовки), від стану обладнання, оснащеності витяжними зондами і системами вентиляції, від ведення процесу плавки (температурних параметрів і при завантаженні шихтових матеріалів, флюсів і розкислювачів).

Сучасне промислове виробництво прагне до розвитку безвідходних технологічних процесів, ширшому використанню у виробництві всіляких відходів і побічних продуктів. Наприклад, нагрівання шихти до температури 550-750°C призводить до видалення вологи, випалюванню олів, ЗОР та ін. забруднювань, частковому видаленню пилу, а також скорочує на 30-35% витрати енергії під час першого періоду плавлення [7]. Маються результати дослідження залежності між утворенням викидів шкідливих речовин від плавильних печей і технологічними параметрами плавлення та побудовані регресійні моделі, що дозволяють обирати оптимальні параметри процесу плавлення та керувати процесом утворення шкідливих речовин[8];

**Висновки.** В результаті проведеного моніторингу екологічної ситуації у металургійному переділі ливарного виробництва при виготовленні виливків з залізівуглецевих сплавів зроблено наступні висновки:

- необхідно проводити реконструкцію діючих ливарних виробництв, що не відповідають сучасним вимогам охорони праці та захисту навколишнього середовища, а також розробляти проекти нових виробництв з прогнозуванням екологічних наслідків прийнятих проектних рішень;

- для зменшення шкідливого впливу ливарного виробництва на навколишнє середовище необхідно проводити моніторинг екологічної безпечності ливарних технологій на стадії проектування або модернізації виробництва;

- у газах, що видаляються від ливарного устаткування і викидаються в атмосферу, міститься пил, що складається в основному з дрібнодисперсних частинок, зміст вільного оксиду кремнію (IV) в яких досягає 60 %. Для поліпшення умов праці в ливарних цехах необхідно здійснювати комплекс заходів, який включає поліпшення технології по всьому переділу, удосконалення

устаткування, впровадження ефективних газовидаляючих установок;

- для зменшення кількості шкідливих викидів в атмосферу та зниження кількості скидань від плавильного обладнання, необхідне створення ресурсозберігаючих, маловідходних технологій, повною мірою це може бути забезпечено при комплексному підході до рішення проблеми ;

- необхідно вдосконалення технології, підвищення рівня міжгалузевої кооперації, координації робіт у питаннях утилізації відходів і захисту навколишнього середовища;

- необхідно раціонально використовувати природні ресурси, знижувати їх споживання технологічними методами й шляхом утилізації відходів, що призведе до екологізації виробництва й зменшення навантаження електросталеплавильного виробництва на навколишнє середовище.

#### Література

1. Кривицкий В.С. «Экологические проблемы литейного производства и пути их развития», (ЗАО «ЦНИИМ-Инвест»), <http://ci.crtm.ru/examples/my-components/news/329/>
2. Ващенко К.И., Шумихин В.С. Плавка и выпечная обработка чугуна для отливок. Учеб. пособие. - К. : Вища школа, 1992.- с. 220-221.
3. Шалевская И.А., Гутько Ю.И., Тарасевич Н.И., \* Токарева\* О.О. Прогнозирование образования выбросов вредных веществ из литейных плавильных печей// *Металл и литье Украины*– 2014. – №9. – с.22-27.
4. Безопасность жизнедеятельности. Учебник. Белов С.В., Сивков В.П., Ильницкая А.В., Морозова Л.Л. и др. (кафедра «Промышленная экология и безопасность» МГТУ им. Н.Э. Баумана) М.: Высшая школа., 2010. 304 с.
5. Юдашкин М.Я. Очистка газов в металлургии. М., «Металлургия», 1976, с. 346-347.
6. Шалевская И.А., Гутько Ю.И. Расчет выбросов загрязняющих веществ в литейном производстве, «Металл и литье Украины», №5, 2011, с. 22-24..
7. Ровин Л.Е., Ровин С.Л., Кукуй Д.М. Экономия энергетических и материальных ресурсов в литейном и металлургическом производстве, - Сборник научных трудов «Металлургия» (ISSN 0369-2450), г.Минск, №31, 2008г., с.107-129.
8. Шалевская И.А. Снижение вредного воздействия литейного производства на окружающую среду применением прогрессивных технологий.// Журнал «Литейщик России» – 2015. – №1. – Москва. – 38-41с.

#### References

1. Krivickij V.S. «Jekologicheskie problemy litejnogo proizvodstva i puti ih razvitija», (ZAO «CNIIM-Invest»), <http://ci.crtm.ru/examples/my-components/news/329/>
2. Vashhenko K.I., Shumihin V.S. Plavka i vnepechnaja obrabotka chuguna dlja otlivok. Ucheb. posobie. - K. : Vishha shkola, 1992.- s. 220-221.

3. Shalevsckaja I.A., Gut'ko Ju.I., Tarasevich N.I., \* Tokareva\* O.O. Prognozirovaniye obrazovaniya vybrosov vrednyh veshhestv iz litejnyh plavil'nyh pechej. *Metall i lit'e Ukrainy*– 2014. – №9. – s.22-27.
4. Bezopasnost' zhiznedejatel'nosti. Uchebnik. Belov S.V., Sivkov V.P., Il'nickaja A.V., Morozova L.L. i dr. (kafedra «Promyshlennaja jekologija i bezopasnost'» MGTU im. N.Je. Baumana) M.: Vysshaja shkola., 2010. 304 s.
5. Judashkin M.Ja. Ochistka gazov v metallurgii. M., «Metallurgija», 1976, s. 346-347.
6. Shalevsckaja I.A., Gut'ko Ju.I. Raschet vybrosov zagryzajushchih veshhestv v litejnom proizvodstve, «Metall i lit'e Ukrainy», №5, 2011, s. 22-24.
7. Rovin L.E., Rovin S.L., Kukuj D.M. Jekonomija jenergeticheskikh i material'nyh resursov v litejnom i metallurgicheskom proizvodstve, - Sbornik nauchnyh trudov «Metallurgija» (ISSN 0369-2450), g.Minsk, №31, 2008g., s.107-129.
8. Shalevsckaja I.A. Snizhenie vrednogo vozdejstvija litejnogo proizvodstva na okruzhajushhuju sredu primeneniem progressivnyh tehnologij. *Zhurnal «Litejshhik Rossii»* – 2015. – №1. – Moskva. – 38-41s.

#### Шалевская И.А. Экологическая ситуация в металлургическом переделе литейного производства при изготовлении отливок из железоуглеродистых сплавов

*В статье рассмотрен вопрос образования выбросов загрязняющих веществ от литейных плавильных печей при плавке железоуглеродистых сплавов, произведен анализ химического состава отходящих газов, приведены удельные показатели по выбросам загрязняющих веществ, сформулированы рекомендации по улучшению экологической ситуации в металлургическом переделе литейного производства. Табл 3. Ист. 8.*

**Ключевые слова:** выбросы, загрязняющие вещества, плавильные агрегаты, удельные показатели, пыль неорганическая, диоксид углерода.

#### Shalevsckaya I.A. Ecological situation in metallurgic repartition process of the foundry industry during iron-oxide alloy casting

*The article considers the topic of polluting substances emission by foundries during iron-oxide alloys casting, analyses chemical composition of emitted gases, reports specific indices of polluting substances emission, and formulates recommendations for improvement of ecological situation in the industrial foundry metallurgic repartition process. Ref. 8.*

**Keywords:** pollution, polluting substances, foundries, pollution indices, non-organic dust, carbon dioxide.

**Шалевська І.А.** – к.т.н., доцент, доцент кафедри прикладної механіки та металургії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, [into66@mail.ru](mailto:into66@mail.ru)

*Рецензент: Осенін Ю.І., д.т.н., проф.*

УДК 621.793.7

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА РАСТВОРЕНИЯ ЯДРА В ПЛАКИРУЮЩЕЙ ОБОЛОЧКЕ ЧАСТИЦ ПРИ НАПЫЛЕНИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОРОШКОВ

Шевченко А.В.

## MATHEMATICAL MODEL OF THE SYNTHESIS OF INTERMETALLIDE DURING THE DEPOSITION OF THE CONGLOMERATE NICKEL – ALUMINIUM POWDERS

Shevchenko A.V.

*Разработана математическая модель процесса диффузионного растворения ядра в плакирующей оболочке частиц при напылении плакированных композиционных порошков. Предложен компьютерный вариант реализации разработанной математической модели. Ист. 4.*

**Ключевые слова:** термореагирующий порошок, гомодисперсный конгломерат, интерметаллиды, парофазное горение, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, плазменное напыление, дистанция напыления.

В настоящее время для нанесения функциональных покрытий все большее применение находят композиционные порошки. В процессе движения частиц порошков в высокотемпературной газовой струе между компонентами, которые входят в состав частиц, может протекать диффузионное и химическое взаимодействие. Степень протекания такого взаимодействия зачастую определяет прочность сцепления, объемную прочность, микротвердость, износостойкость и другие свойства покрытий. К порошкам, в частицах которых при нагревании возможно протекание интенсивного диффузионного взаимодействия между отдельными компонентами, входящими в состав частиц, относятся плакированные и конгломератные композиционные порошки систем “Ni - TiC”, “Ni - WC”, “Ni - Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>”, “Ni - Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>”, “Ni - Ti”, “Ni - Al” [1]. Для плазменного и газоплазменного напыления покрытий наиболее часто используются плакированные порошки. В частицах этих порошков никель выполняет роль плакирующей оболочки, а TiC, WC, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, Ti, Al – роль ядра. Толщина плакирующей оболочки составляет 5...15 мкм, диаметр ядра – 50...100 мкм.

Анализ отечественной и зарубежной литературы показывает, что до настоящего времени не разработаны надежные инженерные методики,

позволяющие оценивать степень диффузионного взаимодействия между компонентами частиц композиционных порошков в зависимости от их температуры и агрегатного состояния [1 - 4].

Целью настоящей работы является разработка математической модели, позволяющей оценивать скорость растворения материала ядра в расплавленной плакирующей оболочке частиц при напылении плакированных композиционных порошков.

Кинетика растворения материала ядра в расплаве плакирующей оболочки относится к условиям внешней задачи. Суммарная скорость процесса растворения ядра может быть определена с помощью модифицированного уравнения Нернста - Шукарева [1]:

$$\frac{dc_{я}}{d\tau} = \frac{S_{я} \cdot D}{V_{об} \cdot \delta_{п}} \cdot (c_{к} - c_{я}), \quad (1)$$

где  $c_{я}$  – текущая концентрация материала ядра в расплавленной оболочке; в начальный момент времени ( $\tau = 0$ )  $c_{я} = 0$ ;

$\tau$  – время растворения;

$S_{я}$  – текущая площадь внешней поверхности ядра;

$V_{об}$  – текущий объем расплава оболочки;

$D$  – коэффициент диффузии;

$\delta_{п}$  – толщина пограничного слоя;

$c_{к}$  – конечная концентрация материала ядра в расплавленной оболочке.

Величина  $c_{к}$  обычно принимается равной исходной массовой доле ядра в частице. Например, для частицы композиционного порошка 20 % Ni - 80 % WC величина  $c_{к} = 0,8$ . При этом по уравнению (1) рассчитывается время, необходимое для полного растворения ядра из карбида вольфрама в никелевой оболочке.

Во время растворения ядра его диаметр уменьшается, соответственно уменьшается и площадь его внешней поверхности  $S_{я}$ . Объем расплава оболочки возрастает и достигает максимального значения (объема всей частицы) после полного растворения ядра ( $c_{я} = c_{к}$ ).

Запишем уравнение (1) в виде:

$$\frac{m_{об} \cdot \delta_n}{\rho_{об} S_{я} \cdot D \cdot (c_{к} - c_{я})} \cdot dc_{я} = d\tau, \quad (2)$$

где  $m_{об}$  – текущая масса расплава оболочки;

$\rho_{об}$  – плотность материала оболочки.

Концентрация материала ядра в расплавленной оболочке определяется как:

$$c_{я} = \frac{m_{яп}}{m_{яп} + m_{об(0)}}, \quad (3)$$

где  $m_{яп}$  – масса материала ядра, растворенная в оболочке;

$m_{об(0)}$  – масса расплава оболочки до начала процесса растворения в ней ядра.

Из уравнения (3) можно выразить массу материала ядра, растворенную в расплавленной плакирующей оболочке, через концентрацию материала ядра в оболочке:

$$m_{яп} = \frac{c_{я} \cdot m_{об(0)}}{1 - c_{я}}. \quad (4)$$

Очевидно, что масса расплава оболочки будет возрастать на величину  $m_{яп}$ :

$$m_{об} = m_{об(0)} + \frac{c_{я} \cdot m_{об(0)}}{1 - c_{я}}, \quad (5)$$

а масса ядра будет уменьшаться на величину  $m_{яп}$ :

$$m_{я} = m_{я0} - \frac{c_{я} \cdot m_{об(0)}}{1 - c_{я}}, \quad (6)$$

где  $m_{я0}$  – масса ядра до начала процесса растворения.

Площадь внешней поверхности ядра определяется как  $S_{я} = 4\pi \cdot r_{я}^2$ , где  $r_{я}$  – радиус ядра. Выразим изменение радиуса ядра через изменение

его массы ( $m_{я}$ ):  $r_{я} = \sqrt[3]{\frac{3m_{я}}{4\pi}}$ . С учетом выражения (6)

радиус ядра в процессе его растворения будет изменяться по уравнению:

$$r_{я} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot \left( m_{я0} - \frac{c_{я} \cdot m_{об(0)}}{1 - c_{я}} \right)}{4\pi}}, \quad (7)$$

а площадь внешней поверхности ядра – по уравнению:

$$S_{я} = 4\pi \cdot \left[ 3 \cdot \left( m_{я0} - \frac{c_{я} \cdot m_{об(0)}}{1 - c_{я}} \right) / 4\pi \right]^{\frac{2}{3}}. \quad (8)$$

Подставляя (5) и (8) в (2), получим дифференциальное уравнение растворения материала ядра в расплавленной оболочке:

$$\frac{\left( m_{об(0)} + \frac{c_{я} \cdot m_{об(0)}}{1 - c_{я}} \right) \cdot \delta_n}{4\pi \cdot \left[ 3 \cdot \left( m_{я0} - \frac{c_{я} \cdot m_{об(0)}}{1 - c_{я}} \right) / 4\pi \right]^{\frac{2}{3}} \cdot \rho_{об} D \cdot (c_{к} - c_{я})} \cdot dc_{я} = d\tau \quad (9)$$

Полученное уравнение учитывает изменение размеров ядра в процессе его растворения в оболочке и изменение площади поверхности, по которой происходит диффузионное взаимодействие между ядром и оболочкой. Вместо постоянного коэффициента диффузии  $D$  в уравнении (9) может быть задана его температурная зависимость  $D(T)$ , если известна зависимость температуры исследуемой системы от времени  $T(\tau)$ . Совмещением функций  $D(T)$  и  $T(\tau)$  находят функцию  $D(\tau)$  и подставляют ее в уравнение (9). Кроме этого, в уравнение (9) может быть введена зависимость коэффициента диффузии от разности концентраций ( $c_{к} - c_{я}$ ).

Поскольку в уравнении (9) произведено разделение переменных, его можно решить непосредственным интегрированием правой и левой частей. Время, необходимое для полного растворения ядра в расплавленной оболочке, определится как:

$$\tau = \int_0^{c_{к}} \frac{\left( m_{об(0)} + \frac{c_{я} \cdot m_{об(0)}}{1 - c_{я}} \right) \cdot \delta_n}{4\pi \cdot \left[ 3 \cdot \left( m_{я0} - \frac{c_{я} \cdot m_{об(0)}}{1 - c_{я}} \right) / 4\pi \right]^{\frac{2}{3}} \cdot \rho_{об} D \cdot (c_{к} - c_{я})} \cdot dc_{я} \quad (10)$$

Величины начальной массы ядра  $m_{я0}$  и начальной массы расплава оболочки  $m_{об(0)}$  определяются согласно геометрическим параметрам частиц:

$$m_{я0} = \frac{4}{3} \pi \cdot \rho_{я} (r_{я0})^3. \quad (11)$$

$$m_{об(0)} = \frac{4}{3} \pi \cdot \rho_{об} \left( r_p^3 - r_{я0}^3 \right), \quad (12)$$

где  $r_p$  – радиус частиц.

Массовое содержание ядра в исходной частице до момента начала его растворения в плакирующей оболочке определяется как:

$$c_k = \frac{m_{я0}}{m_{я0} + m_{об(0)}}. \quad (13)$$

Для решения уравнения (10) следует использовать численные методы интегрирования, поскольку в аналитическом виде получить его решение крайне сложно. Для численных расчетов с использованием ЭВМ уравнение (10) более удобно представить в виде:

$$\tau_i = \int_0^{c_i} \frac{\left( m_{об(0)} + \frac{c_s \cdot m_{об(0)}}{1 - c_s} \right) \cdot \delta_n}{4\pi \cdot \left[ 3 \cdot \left( m_{я0} - \frac{c_s \cdot m_{об(0)}}{1 - c_s} \right) / 4\pi \right]^{2/3} \cdot \rho_{об} D \cdot (c_k - c_s)} \cdot dc_s, \quad (14)$$

где  $i$  – номера элементов в массивах  $\tau_i$ ;  $c_i$  (нумерация элементов массивов начинается с нуля);

$c_i = c_{i-1} + \Delta c$ ,  $\Delta c$  – шаг изменения концентрации материала ядра в расплавленной оболочке.

Количество элементов массивов  $\tau_i$ ;  $c_i$  принимается в зависимости от шага изменения концентрации материала ядра ( $\Delta c$ ) в оболочке. С уменьшением  $\Delta c$  пропорционально возрастает число элементов в массивах  $\tau_i$ ;  $c_i$ .

Начальные условия для численного интегрирования уравнения (14):  $\tau_0 = 0$ ;  $c_0 = 0$ .

На основе полученного массива данных ( $\tau_i$ ;  $c_i$ ) можно построить зависимость концентрации материала ядра в расплавленной оболочке ( $c_s$ ) от времени диффузионного взаимодействия ( $\tau$ ). При  $c_i/c_k = 1$  материал ядра полностью растворяется в оболочке.

**Вывод.** Разработана математическая модель процесса диффузионного растворения ядра в плакирующей оболочке частиц при напылении плакированных композиционных порошков.

### Л и т е р а т у р а

1. Газо-термическое напыление композиционных порошков / А.Я. Кулик., Ю.С. Борисов, А.С. Мнухин, М. Д. Никитин. – Л.: Машиностроение, 1985. – 199с.
2. Production of Titanium Chromium Diboride Powders for Plasma Spraying / Nechiporenko A.S., Knyshev E.A., Klinskaya N.A. International Thermal Spray Conference. – Orlando, Florida. – 1992. – P. 12-18.
3. Клинская Н.А., Королева Е.Б., Петруничев В.А. Получение и свойства металлизированных боридных порошков // Физика и химия обработки материалов. – 1990. – № 5. – С. 42 - 47.

4. Нечипоренко А.С., Клинская Н.А., Степанова З.Г. Изучение взаимодействия диборида титана-хрома с жидкой металлической фазой при плазменном напылении // В сб. Бориды. – ИПМ им. Францевича. – Киев. – 1990. – С. 20 – 25.

### References

1. Gazo-termicheskoe napylenie kompozicionnyh poroshkov / A.Ya. Kulik., Ju.S. Borisov, A.S. Mnuhin, M. D. Nikitin. – L.: Mashinostroenie, 1985. – 199s.
2. Production of Titanium Chromium Diboride Powders for Plasma Spraying / Nechiporenko A.S., Knyshev E.A., Klinskaya N.A. International Thermal Spray Conference. – Orlando, Florida. – 1992. – P. 12-18.
3. Klinskaja N.A., Koroleva E.B., Petrunichev V.A. Poluchenie i svojstva metallizirovannyh boridnyh poroshkov // Fizika i himija obrabotki materialov. – 1990. – № 5. – S. 42 - 47.
4. Nechiporenko A.S., Klinskaja N.A., Stepanova Z.G. Izuchenie vzaimodejstvija diborida titana-hroma s zhidkoj metallicheskoj fazoj pri plazmennom napylenii // V sb. Boridy. – IPM im. Francevicha. – Kiev. – 1990. – S. 20 – 25.

### Шевченко О.В. Математичне моделювання процесу синтезу інтерметалідів при напылюванні конгломератних нікель-алюмінієвих порошків.

*Запропоновано математичну модель, що описує кінетику додаткового тепловиділення в частках композиційних гомодисперсних нікель-алюмінієвих порошків при їх плазмовому напылюванні. Модель дозволяє прогнозувати швидкість та ступінь хімічної взаємодії між нікелем та алюмінієм в умовах поверхневого горіння часток. Наведено технологічні рекомендації щодо вибору дистанції напылювання при нанесенні плазмових покриттів гомодисперсними нікель - алюмінієвими порошками.*

**Ключові слова:** терморезагуючий порошок, гомодисперсний конгломерат, інтерметаліди, парофазне горіння, високотемпературний синтез, що саморозповсюджується, плазмове напылювання, дистанція напылювання.

### Shevchenko A.V. A mathematical model of the synthesis of intermetallic compounds during the deposition of conglomerate nickel-aluminum powders.

*Purpose. The creation of a mathematical model to predict the rate of exothermic reactions in the particles conglomerate powders during spraying.*

*Design/methodology/approach. A mathematical model describing the kinetics of the additional heat in the composite particles gomodispersnyh nickel - aluminum powder in their plasma spraying. The model predicts the rate and extent of chemical interaction between the nickel and aluminum in the surface combustion particles. Given technological advice on the choice of spraying distance when applied plasma coatings gomodispersnyymi nickel - aluminum powders.*

*Findings. The rate of the exothermic reaction in the particles conglomerate gomodispersnyh powders relatively weakly depends on their dispersion. This is due to the high moving speed of the combustion front in the particles. The optimal distance plasma coating conglomerate nickel - aluminum powder is 100 - 120 mm.*

*Originality/value. The production technology for manufacturing of hollow detail by direct extrusion with backpressure has been developed.*

**Key words:** *exothermic powder; the powder of the same particle size; intermetallic compounds; vapor-phase combustion; high-temperature synthesis, which is self-propagating; plasma spraying; spraying distance.*

**Шевченко Олександр Володимирович** – к.т.н., доцент, доцент кафедри прикладної механіки та металургії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, [shv.cmw@ukr.net](mailto:shv.cmw@ukr.net)

*Рецензент:* **Соколов В.І.**, д.т.н., професор

Стаття подана 10.11.2015.

УДК 621.793

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА СИНТЕЗА ИНТЕРМЕТАЛЛИДОВ ПРИ НАПЫЛЕНИИ КОНГЛОМЕРАТНЫХ НИКЕЛЬ – АЛЮМИНИЕВЫХ ПОРОШКОВ****Шевченко А.В.****MATHEMATICAL MODEL OF THE SYNTHESIS OF INTERMETALLIDE DURING THE DEPOSITION OF THE CONGLOMERATE NICKEL – ALUMINIUM POWDERS****Shevchenko A.V.**

*Предложена математическая модель, описывающая кинетику дополнительного тепловыделения в частицах композиционных гомодисперсных никель - алюминиевых порошков при их плазменном напылении. Модель позволяет прогнозировать скорость и степень химического взаимодействия между никелем и алюминием в условиях поверхностного горения частиц. Даны технологические рекомендации по выбору дистанции напыления при нанесении плазменных покрытий гомодисперсными никель - алюминиевыми порошками.*

**Ключевые слова:** терморреагирующий порошок, гомодисперсный конгломерат, интерметаллиды, парофазное горение, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, плазменное напыление, дистанция напыления.

**Введение**

При плазменном напылении никель - алюминиевых порошков синтез интерметаллидных соединений может протекать по двум различным механизмам: в режиме горения или в режиме растворения (диффузионный режим) [1]. Режим растворения может быть реализован в чистом виде только в инертной среде или в вакууме. Он предполагает протекание следующих последовательных процессов: плавление компонентов частицы, растворение алюминия в никеле, химическое взаимодействие никеля и алюминия. Вероятность химического взаимодействия никеля и алюминия в твердой фазе очень низкая вследствие кратковременности пребывания частиц в плазменной струе.

Механизм горения сводится к окислению алюминия, который содержится в частицах. Схему окисления алюминия можно представить с привлечением диффузионной модели парофазного горения металлических частиц [2]. На первой стадии происходит плавление компонентов частицы и развивается процесс химического взаимодействия никеля и алюминия. Одновременно на поверхности частицы образуется пленка оксида алюминия. Вследствие высокой интенсивности теплообмена с

плазменной струей температура на поверхности частицы в течение очень короткого промежутка времени достигает температуры плавления оксида. Диффузия кислорода через пленку жидкого оксида протекает быстрее, чем через твердый оксид. Это приводит к переходу окисления в режим поверхностного горения с частичным испарением оксида.

При напылении на воздухе экзотермические реакции в частицах никель - алюминиевых порошков протекают как в режиме растворения, так и в режиме горения. Доминирование того или другого механизма взаимодействия определяется конструкцией частиц; дисперсностью исходных компонентов, из которых образованы частицы; составом плазмообразующей среды; наличием или отсутствием эффективных защитных устройств, которые препятствуют проникновению воздуха в плазменную струю и в зону напыления (насадки и т.п.). В гомодисперсных конгломератных порошках, частицы которых состоят из высокодисперсных частиц алюминия и никеля, экзотермические реакции протекают в режиме горения [3, 4]. Режим растворения реализуется при напылении плакированных и гетеродисперсных конгломератных порошков [5, 6], однако не в чистом виде, а совместно с режимом поверхностного горения. Экспериментально кинетика экзотермических реакций, протекающих в терморреагирующих композиционных порошках в режиме поверхностного горения, изучена достаточно подробно [5 - 7], однако аналитическое ее описание до настоящего времени отсутствует. Это существенно осложняет систематизацию и сравнительный анализ существующих экспериментальных данных.

Целью настоящей работы является создание математической модели, позволяющей прогнозировать скорость протекания экзотермических реакций в частицах гомодисперсных конгломератных порошков при

напылении в зависимости от скорости поверхностного горения, а также рассчитывать дополнительное повышение температуры частиц в зависимости от степени химического взаимодействия между их компонентами.

### Математическая модель

Явление распространения фронта горения в дисперсных порошковых системах с образованием тугоплавких соединений получило название самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [5]. Отличие условий протекания экзотермической реакции в реакторе СВС и в отдельных частицах порошков при напылении состоит в следующем:

1. В изолированности микрообъема, который представляет собой частица композиционного порошка.

2. В конфигурации, характере возникновения и движении фронта горения. При протекании реакции в реакторе фронт горения плоский, зажигание одностороннее, а движение фронта горения одномерное. В частицах композиционных порошков при напылении фронт горения сферический, зажигание всестороннее, фронт горения перемещается от поверхности частицы к ее геометрическому центру.

Из теории горения гетерогенных систем известно уравнение, которое связывает скорость химического взаимодействия между компонентами системы со скоростью перемещения фронта горения [5]:

$$-\frac{dV}{d\tau} = u(\tau) \cdot S(\tau), \quad (1)$$

где  $V$  – непрореагировавший объем частицы;  
 $u(\tau)$  – скорость перемещения фронта горения;  
 $S(\tau)$  – площадь поверхности раздела между прореагировавшим и непрореагировавшим объемами частицы.

Скорость перемещения фронта горения представляет собой производную:

$$u(\tau) = -\frac{dr}{d\tau}, \quad (2)$$

где  $r$  – координата фронта горения ( $r = r_p \dots 0$ ,  $r_p$  – радиус частицы).

Полагая скорость перемещения фронта горения постоянной ( $u = const$ ), найдем закон изменения координаты фронта горения во времени  $r(\tau)$ . Если  $u = const$ , в уравнении (2) можно разделить переменные и проинтегрировать обе его части:  $\int -dr = \int u d\tau$ . Тогда  $-r(\tau) = u\tau + C$ ,  $C$  – константа интегрирования.

Для начальных условий  $\tau = 0$ ;  $r = r_p$  константа  $C$  определится как  $C = -r_p$ . Таким образом

$$r(\tau) = r_p - u\tau. \quad (3)$$

Площадь поверхности раздела между прореагировавшим и непрореагировавшим объемами частицы определяется как  $S(\tau) = 4\pi[r(\tau)]^2$ . С учетом (3)

$$S(\tau) = 4\pi[r_p - u\tau]^2. \quad (4)$$

Для выполнения дальнейших расчетов введем следующие обозначения:  $V_\Sigma$  – общий объем частицы ( $V_\Sigma = \frac{4}{3}\pi r_p^3$ );  $\alpha$  – степень взаимодействия, которая представляет собой отношение прореагировавшего объема частицы ( $V_\Sigma - V$ ) к ее общему объему ( $V_\Sigma$ ):

$$\alpha = \frac{V_\Sigma - V}{V_\Sigma}. \quad (5)$$

где  $V$  – непрореагировавший объем частицы.

Из уравнения (5) найдем функциональную связь между непрореагировавшим объемом частицы ( $V$ ) и степенью превращения ( $\alpha$ ):

$$V = \frac{4}{3}\pi r_p^3(1 - \alpha). \quad (6)$$

В дифференциальной форме уравнение (6) запишется как

$$dV = -\frac{4}{3}\pi r_p^3 \cdot d\alpha. \quad (7)$$

После подстановки (4) и (7) в (1) с учетом того, что  $u(\tau) = u = const$  получим следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{d\alpha}{d\tau} = \frac{3u}{r_p} - \frac{6u^2\tau}{r_p^2} + \frac{3u^3\tau^2}{r_p^3}. \quad (8)$$

Уравнение (8) определяет скорость химического взаимодействия между компонентами частиц гомодисперсного порошка в режиме горения как производную степени превращения ( $\alpha$ ) по времени ( $\tau$ ).

Из уравнения (3) можно определить время, необходимое для полного завершения реакции экзотермического взаимодействия по всему объему частицы, когда выполняется условие  $r(\tau) = 0$ :

$$\tau_{(\alpha=1)} = \frac{r}{u}. \quad (9)$$

Увеличение температуры частицы на величину  $T_p$  за счет теплового эффекта химических реакций между ее компонентами определяется как [1]:

$$\frac{d(\Delta T_p)}{d\tau} = \Delta T_{ad} \cdot \frac{d\alpha}{d\tau} \tag{10}$$

Подставляя (8) в (10), получим:

$$\frac{d(\Delta T_p)}{d\tau} = \Delta T_{ad} \left( \frac{3u}{r_p} - \frac{6u^2\tau}{r_p^2} + \frac{3u^3\tau^2}{r_p^3} \right) \tag{11}$$

Для решения уравнения (11) разделим переменные и проинтегрируем его правую и левую части:

$$\int d(\Delta T_p) = \frac{3\Delta T_{ad} \cdot u}{r_p} \int d\tau - \frac{6\Delta T_{ad} \cdot u^2}{r_p^2} \int \tau d\tau + \frac{3\Delta T_{ad} \cdot u^3}{r_p^3} \int \tau^2 d\tau \tag{12}$$

После интегрирования (12) получим зависимость приращения (увеличения) температуры частиц конгломератных гомодисперсных порошков за счет протекания в них экзотермических реакций в режиме горения:

$$\Delta T_p(\tau) = \frac{3\Delta T_{ad} \cdot u \cdot \tau}{r_p} - \frac{3\Delta T_{ad} \cdot u^2 \cdot \tau^2}{r_p^2} + \frac{\Delta T_{ad} \cdot u^3 \cdot \tau^3}{r_p^3} \tag{13}$$

Для конгломератных гомодисперсных порошков Ni - 8 мас. % Al дисперсностью 60 - 100 мкм, полученных из механической смеси порошков никеля и алюминия фракции 5 - 10 мкм,  $\Delta T_{ad} = 1200 - 1300^\circ\text{C}$ ;  $u = 7 - 8$  см/с [3]. Определение адиабатического повышения температуры и скорости горения проводилось в реакционной камере, заполненной смесью аргона с 30 об. % воздуха.

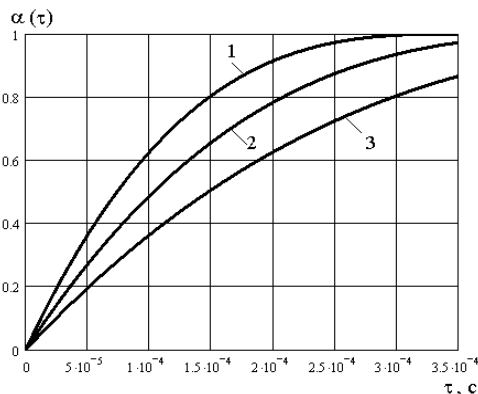


Рис. 1. Кинетика экзотермического взаимодействия в частицах конгломератного гомодисперсного композиционного порошка Ni - 8 мас. % Al: диаметр частиц 50 мкм (1), 70 мкм (2), 100 мкм (3); скорость горения 7 см/с

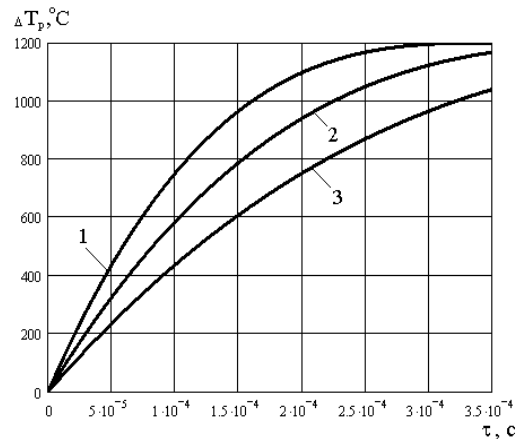


Рис. 2. Кинетика дополнительного тепловыделения в частицах конгломератного гомодисперсного композиционного порошка Ni - 8 мас. % Al за счет протекания в них экзотермических реакций: диаметр частиц 50 мкм (1), 70 мкм (2), 100 мкм (3); скорость горения 7 см/с;  $\Delta T_{ad} = 1200^\circ\text{C}$

Результаты расчетов по уравнению (13) кинетики дополнительного тепловыделения в частицах диаметром 50, 70 и 100 мкм при  $\Delta T_{ad} = 1200^\circ\text{C}$  и  $u = 7$  см/с приведены на рис. 1, 2. Полученные данные свидетельствуют об относительно слабом влиянии дисперсности частиц на скорость протекания в них экзотермических реакций. Это обусловлено высокой скоростью перемещения фронта горения. В свою очередь высокая скорость перемещения фронта горения связана с высокой дисперсностью частиц алюминия и никеля, которые образуют никель - алюминиевый конгломерат. В частицах диаметром 50 - 70 мкм экзотермическая реакция полностью заканчивается за  $(3,0 - 3,5) \cdot 10^{-4}$  с (рис. 1). После такого же времени взаимодействия достигается максимальное тепловыделение в частицах ( $\Delta T_p = \Delta T_{ad}$ ) (рис. 2). В частицах диаметром 100 мкм повышение температуры после  $3,5 \cdot 10^{-4}$  с с начала взаимодействия составляет  $\Delta T_p = 0,87\Delta T_{ad}$  (рис. 2).

Важно отметить, что время, в течение которого экзотермические реакции в частицах протекают в полном объеме, приблизительно совпадает со временем нахождения частиц в высокотемпературной зоне плазменной струи. Это означает, что процесс плазменного нанесения покрытий конгломератными никель - алюминиевыми гомодисперсными порошками следует проводить на минимальных дистанциях напыления, но таким образом, чтобы не перегреть основу с покрытием. При выборе оптимальной дистанции напыления кинетика протекания экзотермических реакций в частицах не является лимитирующим фактором, поскольку экзотермические реакции протекают с высокой скоростью.

**Выводы.**

1. Скорость протекания экзотермической реакции в частицах конгломератных гомодисперсных порошков относительно слабо зависит от их дисперсности. Это обусловлено высокой скоростью перемещения фронта горения в частицах.

2. Оптимальная дистанция плазменного нанесения покрытий конгломератными никель - алюминиевыми порошками составляет 100 - 120 мм.

**Литература**

1. Ю.С. Борисов. Газо-термическое напыление композиционных порошков – К.: Наук. думка, 1991. – 299с.
2. К теории процессов горения в гетерогенных конденсированных средах / Б.И. Хайкин. – В кн.: Процессы горения в химической технологии. – М.: АН СССР. – 1991. – С. 227 - 244.
3. Боровинская И.П. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез неорганических соединений. – М.: Энергия, 2007. – 250с.
4. Л.М. Лужевич. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез в высокодисперсных системах. – Полоцк: Изд-во ПГУ, 2007. – 250с.
5. Похмурский М.М., Сидорак І.Й., Довгунік М.В. Покрытия з порошкових і дрових матеріалів. – Львів: Вид-во ФМІ ім. Г.В. Карпенка, 2007. – 198с.
6. Плазменные покрытия системы Ni-Ti для защиты титановых сплавов от износа / Ф.И. Китаев, А.Г. Цицулко. – В кн.: Высокотемпературная защита материалов. – Л.: Наука. – 1991. – С. 132 - 154.
7. Илюшенко П.А. Синтез интерметаллидных соединений при газо-термическом напылении композиционных порошков – Минск: Техника, 2006. – 204с.

**References**

1. J.S Borisov. Gas-thermal spraying composite powders. – K.: Nauk. dumka, 1991. – 299p.
2. On the theory of combustion processes in heterogeneous condensed media / B.I Chaikin: the combustion processes in chemical technology. – M.: AN USSR. – 1991. – P. 227 - 244.
3. Borovinskaya I.P Self-propagating high-temperature synthesis of inorganic compounds. - Moscow: Energiya, 2007. – 250p.
4. L.M Luzhevich. Self-propagating high-temperature synthesis of highly dispersed systems. - Polotsk: Publishing House of the University, 2007. – 250p.
5. Pohmursky M.M, Sidorak I.I, Dovgunik M.V. Coatings from powder and wire material. - Lvov: FMI them. G.V Karpenko, 2007. – 198p.
6. Plasma coating of Ni-Ti titanium alloys for protection against wear / F.I Kitaev, A.G Tsidulko: igh-temperature protection materials. - Leningrad: Nauka. - 1991. - P. 132 - 154.

7. Pyushenko P.A. Synthesis of intermetallic compounds in the gas-thermal spraying composite powders - Minsk: Technology, 2006. – 204p.

**Шевченко О.В. Математичне моделювання процесу синтезу інтерметалідів при напилюванні конгломератних нікель-алюмінієвих порошків.**

*Запропоновано математичну модель, що описує кінетику додаткового тепловиділення в частках композиційних гомодисперсних нікель-алюмінієвих порошків при їх плазмовому напилюванні. Модель дозволяє прогнозувати швидкість та ступінь хімічної взаємодії між нікелем та алюмінієм в умовах поверхневого горіння часток. Наведено технологічні рекомендації щодо вибору дистанції напилювання при нанесенні плазмових покриттів гомодисперсними нікель - алюмінієвими порошками.*

**Ключові слова:** терморезагуючий порошок, гомодисперсний конгломерат, інтерметаліди, парофазне горіння, високотемпературний синтез, що саморозповсюджується, плазмове напилювання, дистанція напилювання.

**Shevchenko A.V. A mathematical model of the synthesis of intermetallic compounds during the deposition of conglomerate nickel-aluminum powders.**

*Purpose. The creation of a mathematical model to predict the rate of exothermic reactions in the particles conglomerate powders during spraying.*

*Design/methodology/approach. A mathematical model describing the kinetics of the additional heat in the composite particles gomodispersnyh nickel - aluminum powder in their plasma spraying. The model predicts the rate and extent of chemical interaction between the nickel and aluminum in the surface combustion particles. Given technological advice on the choice of spraying distance when applied plasma coatings gomodispersnyymi nickel - aluminum powders.*

*Findings. The rate of the exothermic reaction in the particles conglomerate gomodispersnyh powders relatively weakly depends on their dispersion. This is due to the high moving speed of the combustion front in the particles. The optimal distance plasma coating conglomerate nickel - aluminum powder is 100 - 120 mm.*

*Originality/value. The production technology for manufacturing of hollow detail by direct extrusion with backpressure has been developed.*

**Key words:** exothermic powder; the powder of the same particle size; intermetallic compounds; vapor-phase combustion; high-temperature synthesis, which is self-propagating; plasma spraying; spraying distance.

**Шевченко Олександр Володимирович** – к.т.н., доцент, доцент кафедри прикладної механіки та металургії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, [shev.cmw@ukr.net](mailto:shev.cmw@ukr.net)

*Рецензент:* **Осенін Ю.І.**, д.т.н., проф.

Стаття подана 10.11.2015.

УДК 621.9.048

## АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССА ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ СЪЕМА МЕТАЛЛА С УЧЕТОМ ФОРМЫ АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА

Шумакова Т.А.

## ANALYSIS OF MATHEMATICAL MODELS OF THE PROCESS OF VIBRATORY PROCESSING FOR DETERMINING METAL REMOVAL RATES WITH REGARD TO THE SHAPE OF THE ABRASIVE TOOL

Shumakova T.A.

*В статье приведены результаты анализа математических моделей, описывающих процесс вибрационной обработки деталей. В ходе теоретических и экспериментальных исследований был выведен ряд зависимостей, позволяющих на этапе проектирования технологических процессов вибрационной обработки деталей в среде свободных абразивов определить наиболее рациональную форму используемого инструмента. Полученные зависимости съема металла в единицу времени показывают, что он достигает максимального значения при обработке образцов из стали, латуни и алюминия в гранулах, имеющих максимальное количество ребер – гранул в форме пирамиды, в основании которой лежит невыпуклый шестиугольник.*

**Ключевые слова:** *вибрационная обработка, инструмент, абразивная гранула, математическое моделирование.*

**Введение.** Вибрационная обработка деталей в среде свободных абразивов является одним из наиболее перспективных и распространенных методов отделочно-зачистной обработки. Этот метод позволяет осуществлять широкий диапазон операций: удаление заусенцев, очистку их от окалины, уменьшение шероховатости поверхности и повышение качества поверхностного слоя, подготовку поверхностей деталей под нанесение покрытия и многие другие. Процесс вибрационной обработки является многофакторным, его эффективность определяется более чем пятьюдесятью факторами [1–3] наименее изученным из которых является форма применяемого инструмента – абразивной гранулы.

Как утверждает автор работы [1], форма (подразумевается геометрическая форма и размер) наравне с массой и абразивными свойствами играет значительную роль при контактном взаимодействии детали и гранулы, количество ребер определяют укладку и оказываемое на поверхность

обрабатываемой детали давление. Кроме того, форма влияет на передачу силового импульса в зону обработки. Следует также отметить, что такое свойство гранул как их износ также во многом определяется их формой [4].

Несмотря на столь значительное влияние в большинстве исследований, рассматривающих гранулы рабочей среды, авторы избегают непосредственно исследовать аспекты выбора формы, касаясь лишь смежных факторов для этого прибегая к ряду грубых допущений.

Из всего обилия работ, можно выделить лишь несколько, где теоретически рассматривались вопросы выбора геометрической формы, а именно [1, 2]. При этом автор первой работы исследовал форму, рассматривая только статическую укладку и ограничиваясь основными двумерными примитивами (окружности, прямоугольники, квадраты). Во второй работе был рассмотрен профиль контакта и микрогеометрия абразива.

Руководствуясь анализом, проведенным в [1, 2, 3], к основным допущениям в работах по исследованию геометрических свойств гранул, относятся:

– двумерное моделирование контактного взаимодействия гранулы и обрабатываемой поверхности;

– примитивную форму самих гранул (сферы, параллелепипеды, пирамиды);

– пятно контакта рассматривалось как окружность или эллипс.

Эти допущения обосновываются плоскопараллельным движением самого контейнера, а также сложностью моделирования взаимодействия гранул и детали в трех измерениях. Однако ориентация самой детали, ее возможная форма, а также форма гранул исключают такой подход, поскольку их взаимное движение в общем

случае будет осуществляться вне плоскости колебаний контейнера и не соответствует движению примитивов, которыми представляют гранулы.

На сегодняшний день существует теория и общепринятые методы определения съема на основе данных о силе и площади контакта, также свойствах абразивного инструмента, однако полученные результаты разрознены и в ряде случаев противоречат друг другу.

Цель работы – на основании имеющихся экспериментальных данных, провести сравнительный анализ найти зависимости, для определения величины съема металла с поверхностей деталей, выполненных из различных материалов, абразивными гранулами различных геометрических форм.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Проанализировать результаты исследований направленных на выявление зависимости отражающей влияние формы абразивных гранул на производительность процесса вибрационной обработки деталей в среде свободных абразивов.

2. Проанализировать результаты исследований, приведенные в [5], и составить план проведения исследований по выявлению зависимости, отражающей влияние формы абразивных гранул на съем металла.

3. Используя метод аппроксимирования вывести экспоненциальную зависимость для определения съема металла в единицу времени при обработке деталей, выполненных из алюминия АЛ-9, стали 3 или латуни ЛС 59-1Л в гранулах различных геометрических форм.

**Анализ последних исследований и публикаций.** При рассмотрении взаимодействия гранул с деталью следует рассматривать и работы, в которых уделялось внимание движению множества рабочих гранул, движению единичной гранулы и детали, взаимодействию рабочих гранул с поверхностью обрабатываемой детали. Проанализировав результаты исследований, приведенные в [1, 2, 3, 6], можно отметить, что, как уже указывалось выше, определение металлосъема с поверхностей обрабатываемых деталей можно разделить на два основных подхода, а именно: определение съема металла с поверхности обрабатываемой детали единичным зерном абразивного инструмента (его определение аналогично традиционным методам финишной обработки, и поэтому в данной работе далее он не рассматривается) [1, 2], и определение съема металла с поверхности обрабатываемой детали единичной гранулой определенной формы (свойственно только для финишных методов обработки на станках без жесткой кинематической связи, например, вибрационной) [3, 6].

Попытка решения задачи нахождения единичного съема за один удар абразивной гранулы

с последующим учетом количества этих ударов, приходящихся на единицу площади обрабатываемой поверхности, абразивными гранулами различной формы была осуществлена автором работы [1]. Величину съема металла в общем виде он предлагает выразить зависимостью:

$$Q = c \cdot N_{ед} \cdot V_{ср} \cdot f_y \cdot T, \quad (1)$$

где  $c$  – коэффициент, учитывающий число ударов, обеспечивающих микрорезание, зависящий от режимных параметров обработки;  $N_{ед}$  – действительное число гранул, размещающихся на единице площади обрабатываемой поверхности,  $1/мм^2$ ;  $V_{ср}$  – средний по резервуару объем металла, снятого с обрабатываемой поверхности за один удар абразивной гранулы,  $мм^3$ ;  $f_y$  – частота соударений,  $мин^{-1}$ ;  $T$  – время обработки,  $мин$ .

Влияние формы абразивных гранул на производительность процесса вибрационной обработки Г. Венцкевич выражает через величину  $N_{ед}$  (действительное число гранул, размещающихся на единице площади обрабатываемой поверхности,  $1/мм^2$ ). Автор работы делает выводы, что число следов гранул на единице поверхности зависит от геометрической формы и размеров гранулы, вида и размера обрабатываемой поверхности. На плоских поверхностях число следов тетраэдральной гранулы наименьшее и увеличивается для конусных гранул на 22 – 30 %, призматических - на 19 – 37 %, шара - на 42 %, цилиндрических - на 56 – 64 %. На цилиндрических и сферических поверхностях степень преобладания цилиндрических и шаровидных гранул над остальными формами гранул значительно меняется с изменением радиуса обрабатываемой поверхности и размера гранулы. На величину среднего объема снимаемого металла за один удар абразивной гранулы существенное влияние оказывает площадь контакта гранулы с деталью и объемная плотность укладки гранул абразива в контейнере. Обе величины достигают наибольших значений при обработке в гранулах с плоскими гранями и оказывают решающее влияние на эффективность применяемых абразивных гранул.

Однако автором работы [1] не был учтен тот факт, что в процессе вибрационной обработки абразивная гранула стремится занять положение равновесия относительно своего центра масс, т.е. положение с минимальным моментом инерции (под воздействием вибрации она самоориентируется). Описанная им максимально возможная укладка гранул различных форм по различным видам поверхностей была проведена в статике и не соответствует укладке гранул по этим поверхностям в динамике [5, 7]. Поэтому нахождение связи между съемом металла и формой гранулы требует продолжения исследований.

Для описания процесса вибрационной обработки используются также вероятностно-кинематические модели, аналогичные

используемым в молекулярной физике. К их достоинствам можно отнести то, что подобные модели позволяют учесть стохастичность процесса, т.е. случайную флуктуацию кинематических и динамических параметров обрабатываемой среды. Так, например, в работе [3] вероятностно-кинематическая модель описывает взаимодействие рабочей среды с деталью, принимая во внимание специфику процессов (циркуляционную скорость, форму самой гранулы) и позволяет рассчитать съем металла. Однако существует проблема усреднения различных коэффициентов, т.к. зависимость этого усреднения от конкретных условий усложняет определение параметров, характеризующих производительность процесса. Сам автор [3] указывает, что «...интенсификации съема как результата виброабразивной обработки можно добиться, нарушая однородность циркуляционного потока и увеличивая тем самым относительную скорость элементов рабочей среды вибрирующего контейнера вибрационного станка. Однако непосредственно использовать полученные зависимости в случае резкого нарушения неоднородности циркуляционного движения загрузки (когда коэффициент пропорциональности между силой, вынуждающей движение элементов загрузки в вибрирующем контейнере, и циркуляционной скоростью сам будет зависеть от этой скорости) нельзя».

Автор работы [3] для определения величины съема металла с поверхностей обрабатываемых деталей абразивными гранулами различных форм приводит следующие зависимости:

а) для гранул произвольной формы [3]:

$$Q = k_A^2 \cdot K_k \cdot K_{KP}^{2/3} \cdot T^{2,5/3} \cdot \frac{c_{MD}}{Y_T} \sqrt{m_{гр} \cdot c_{МГ} \cdot HB_{гр} \cdot S_{гр}^2} \times \frac{\chi_v}{4} \cdot k_{yn} \cdot A_K^2 \cdot \psi_K^{7/3} \cdot T \quad (2);$$

при этом, как указывается в [8] в общем случае определение коэффициента  $k_{yn}$  представляет некоторую задачу стереометрии, где  $k_{yn}$  – определяет число контактных площадок на поверхности обрабатываемой детали, которые могут быть созданы одновременно при плотной укладке на этой поверхности абразивных гранул заданной формы;  $k_A$  – коэффициент изменения амплитуды вибрационного перемещения в зависимости от расстояния какого-либо элемента загрузки до стенки вибрирующего контейнера;

$$K_K = k_H \cdot k_{ж}, \quad (3)$$

где  $k_H$  – коэффициент износа;  $k_{ж}$  – коэффициент, учитывающий возможный жидкостный контакт;

$$K_{KP} = \sqrt{k_E}, \quad (4)$$

где  $k_E$  – коэффициент, учитывающий условия взаимодействия абразивных гранул с поверхностью обрабатываемых деталей [3];

$$\zeta = \left( \frac{\tau_0}{t_0} \right)_{cp}, \quad (5)$$

где  $\tau_0 / t_0$  – характеристика стохастичности в движении абразивных гранул, равная среднему по всем гранулам значению ( $\tau$  – параметр случайного блуждания;  $t$  – момент времени);  $\rho_{мд}$  – плотность вещества детали;  $\sigma_T$  – предел текучести материала обрабатываемой детали;  $m_{гр}$  – масса абразивной гранулы,  $m_{гр} = \rho_{мг} \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R_{гр}^3$ ;  $\rho_{мг}$  – плотность вещества гранулы;  $H_{В.гр}$  – твердость материала гранулы по Бринеллю;  $S_{гр}$  – площадь поверхностей абразивной гранулы;  $\chi_v$  – объемное содержание абразивных зерен внутри гранулы;  $A_K$  – амплитуда колебаний контейнера;  $\omega_K$  – частота колебаний контейнера;  $T$  – время обработки, мин.

б) для гранул сферической формы [3]:

$$Q = k_A^2 \cdot K_k \cdot K_{KP}^{2/3} \cdot T^{2,5/3} \cdot \frac{\chi_v}{4} \cdot \frac{c_{MD}}{Y_T} \sqrt{\frac{p^2 \cdot m_{гр} \cdot c_{МГ} \cdot H_{В.гр}}{4 \cdot R_{гр}^2}} \times S_d \cdot A_K^2 \cdot \psi_K^{7/3} \cdot T; \quad (6);$$

Коэффициент  $k_{yn}$  как указывается в [3], для гранул сферической формы можно определить по следующей зависимости:

$$k_{yn} = \frac{S_d}{4 \cdot R_{гр}^2}, \quad (7);$$

где  $S_d$  – площадь обрабатываемой поверхности детали;  $R_{гр}$  – радиус гранулы сферической формы;

в) для гранул в форме правильных трехгранных призм [3]:

$$Q = k_A^2 \cdot K_k \cdot K_{KP}^{2/3} \cdot T^{2,5/3} \cdot \frac{c_{MD}}{Y_T} \sqrt{m_{гр} \cdot c_{МГ} \cdot HB_{гр} \cdot S_{гр}^2} \times \frac{\pi \cdot \chi_v}{4} \cdot \frac{A_K^2 \cdot \psi_K^{7/3} \cdot T}{\arctg\left(\frac{d_{гр}}{2R_d}\right)} \cdot \frac{l_d}{l_{гр}}; \quad (8)$$

Коэффициент  $k_{yn}$  для гранул в форме правильных трехгранных призм, по мнению [3], определяется как:

$$k_{yn} = \frac{\pi}{\arctg\left(\frac{d_{гр}}{2R_d}\right)} \cdot \frac{l_d}{l_{гр}}, \quad (9)$$

где  $d_{гр}$  – длина стороны основания абразивной гранулы;  $l_{гр}$  – высота абразивной гранулы;  $R_d$  – радиус основания цилиндрической детали;  $l_d$  – длина образующей цилиндрической детали.

Однако для определения значения величины съема металла по зависимостям 2-9 с учетом формы абразивной гранулы необходимо решение задачи определения числа контактных площадок на поверхности обрабатываемой детали, которые могут быть созданы одновременно при плотной укладке на этой поверхности абразивных гранул заданной формы. При этом автор работы [3], как и [1], рассматривает максимально плотную укладку гранул в статике. Это заведомо приводит к неадекватному определению величины съема металла, т.к. укладка гранул по поверхностям обрабатываемых деталей в динамике значительно отличается от максимально плотной укладки в статике.

Большой интерес представляет работа [2]. Автор данной работы ставил задачу: нахождение такого геометрического параметра абразивного инструмента, по величине которого можно было бы судить о производительности процесса, измеряемой в съеме металла. Решение поставленной задачи было осуществлено введением таких понятий, как острота рельефа гранулы  $L$  и критический радиус кривизны профиля абразивной гранулы  $R_k$ . В работе [2] принято, что параметр  $L$  оценивает генеральную совокупность профилей рельефа абразивной гранулы и представляет собой аналог профиля режущего клина лезвийного инструмента. Зависимость для определения величины, характеризующей остроту рельефа абразивной гранулы, по мнению автора [2], имеет следующий вид:

$$L = 3,385 \cdot K \cdot \sigma_\varepsilon \cdot \alpha_\varepsilon^{3/2}, \quad (10)$$

где  $K = \frac{k_1}{k_2}$ , а  $k_1$ ,  $k_2$  – коэффициенты пропорциональности;  $\sigma_\varepsilon$  – среднее квадратическое отклонение ординат профиля рельефа абразивных гранул, описываемое годографом вектора  $\vec{\varepsilon}$ , т.е. среднее квадратическое отклонение последовательности значений  $\varepsilon_i$  случайных ординат функции  $\varepsilon(x)$  с нулевым средним

$E(\varepsilon(x)) = 0$ ;  $\alpha_\varepsilon$  – параметр, характеризующий чувствительность корреляционной связи между сечениями случайных ординат  $\varepsilon_i$  функции  $\varepsilon(x)$ .

На основе утверждений о том, что в начальный период обработки наблюдается большой расход абразивной массы из-за скола острокромочных участков и катастрофическое разрушение уже обкатанных абразивных гранул, линейные размеры которых менее 10 мм, автор работы [2] и предположил о существовании критического радиуса поверхности абразивных гранул ( $R_k$ ), т.е. радиуса, при котором еще сохраняется устойчивость формы гранул [2], при этом, по мнению [2], критический радиус кривизны  $R_k$  находится в зависимости от остроты рельефа гранул  $L$ .

Согласно [2] устойчивость формы гранул будет определяться следующим выражением:

$$E(R) = \mu \cdot \frac{1,258 \cdot \pi^2}{\sigma_\varepsilon \cdot \alpha_\varepsilon}, \quad (11)$$

где  $E(R)$  – номинальный радиус кривизны поверхности абразивных гранул;  $\mu$  – коэффициент, зависящий от формы абразивных гранул ( $\mu \geq 1$ ).

При этом связь между критическим радиусом  $R_k$  абразивных гранул и их остротой рельефа  $L$  автор [2] выражает следующим образом:

$$R_k = K \cdot \frac{7,548 \sqrt{\pi^3 \cdot \alpha_\varepsilon}}{L}. \quad (12)$$

Принимая во внимание, что числитель дроби есть некоторая постоянная, автором работы [2] было установлено:

$$R_k = \frac{const}{L} \quad (13)$$

Можно сделать вывод, что каждому значению критического радиуса  $R_k$  должна соответствовать вполне определенная острота рельефа абразивных гранул, измеряемая параметром  $L$ . Кроме того, сам параметр  $L$ , исходя, представляет не что иное, как кривизну линии профиля гранул абразивного наполнителя в рассматриваемой точке. Это обстоятельство подчеркивает правильность подбора нужного термина для параметра  $L$ , оценивающего режущую способность гранул абразивного наполнителя.

В конечном итоге автор данной работы приходит к выводу, что величина критического радиуса  $R_k$  зависит от остроты рельефа абразивной гранулы  $L$ . При этом в зависимости (10) единственной переменной величиной является  $\sigma_\varepsilon$ , представляющая собой среднее квадратическое отклонение ординат профиля рельефа абразивных

гранул и определяемая [2] экспериментальным путем.

Однако автор работы [2], найдя показатели работоспособности ( $L$ ) и износостойкости ( $R_k$ ) абразивных гранул произвольных форм, не переходит к зависимости, позволяющей оценить производительность процесса – величину снимаемого металла с поверхностей обрабатываемых деталей гранулами определенной формы, остановившись на определении ее долговечности.

Авторы работы [9] считают, что для решения проблемы выбора абразивного инструмента с учетом его оптимальных технологических характеристик для той или иной операции вибрационной обработки необходимо установление математической модели, учитывающей все факторы, описывающие процесс микрорезания:

$$Q(f) = f(V_0, P, \omega, K_\phi, K_K, N_3(K_3), K_p, \sigma_T, R, B, \rho_{ab}, \rho_o, t) \quad (14)$$

где  $V_0$  – скорость движения абразивной частицы;  $P$  – сила сопротивления;  $\omega$  – частота колебаний;  $K_\phi$  – коэффициент, учитывающий форму абразивной гранулы;  $K_K$  – коэффициент, учитывающий влияние концентрации абразивных зерен;  $N_3$  – зернистость абразива;  $K_3$  – коэффициент, учитывающий зернистость абразива;  $K_p$  – коэффициент, учитывающий количество режущих зерен;  $\sigma_T$  – предел текучести материала детали;  $R$  – характерный размер гранулы;  $\rho_{ab}, \rho_o$  – плотность материала детали, абразива;

$B$  – характеристика связи;  $t$  – время обработки.

При полной систематизации характеристик процесса и параметров определенных гранул на сегодня не осуществлен переход к нахождению функциональной взаимосвязи показателей этой системы. Авторы данной работы приводят только лишь некоторые значения из вышеуказанных коэффициентов (см. табл. 1).

Таблица 1

**Значения коэффициентов, используемых для нахождения съема металла по зависимости 14**

Управляющий показатель	Обозначение	Ед. изм.	Максимальное значение параметра	Минимальное значение параметра
Радиус частицы (гранулы)	R	м	0,01	0,005
Доля, занимаемая абразивными зёрнами в единице объема гранулы	$\chi$	-	0,7	0,3
Коэффициент формы зерна	$\alpha$	-	0,8	0,4
Функция, зависящая от $\alpha$	$I(\alpha)$	-	0,8	0,5
Коэффициент, учитывающий заделку зерен в связке	$\epsilon_z$	-	0,7	0,5
Коэффициент, учитывающий количество режущих зерен	$K_p$		0,5	0,2
Эффективная скорость соударения	$V_0$	м/с	1,0	0,5
Плотность абразива	$\rho_r$	кг/м	2300	1900
Коэффициент формы гранулы	$K_\phi$	-	1,5	0,5
Плотность материала детали	$\rho_d$	кг/м <sup>3</sup>	7800	6500
Коэффициент, оценивающий несущую способность контактной поверхности	c	-	9	3
Предел текучести материала детали	$\sigma_T$	МПа	1000	300

Авторы [9] указывают, что при оценке производительности процесса вибрационной обработки форму абразивного инструмента можно учесть при помощи коэффициента  $K_\phi$  и приводят его численные значения в пределах 0,5...1,5. Но в работе не указано, каким образом определяются значения вышеуказанных параметров и чему они равны в каждом из конкретных случаев применения той или иной формы абразивной гранулы, а также не найдена взаимосвязь между перечисленными параметрами, оказывающими влияние на производительность процесса вибрационной обработки.

Из данного всего вышесказанного следует, что геометрия гранулы является одной из наиболее важных характеристик. Тем не менее, преимущества гранулы той или иной формы показаны лишь экспериментально, по величине съема металла [1-3, 9]. Теоретические доказательства по эффективному применению гранул определенной формы практически отсутствуют и требуют дальнейших исследований.

**Разработка модели определения наиболее рациональной формы гранулы.** В связи со всем вышесказанным задачу выбора формы гранулы необходимо решать на основе исследования динамических характеристик взаимодействия

трехмерной гранулы определенной, заданной формы с поверхностью обрабатываемого изделия.

Как известно, траектория движения контейнера серийно выпускаемого вибрационного станка имеет довольно сложную форму (рис. 1) [7], напоминающую вытянутый по вертикали эллипс, и отличается в различных его точках. Под воздействием стенок контейнера сквозь рабочую среду на каждом периоде колебаний проходят волны деформации [10, 11, 12], это позволяет определить изменение расчетной траектории движения элементов рабочей среды в зависимости от ее свойств [11] (рис. 1).

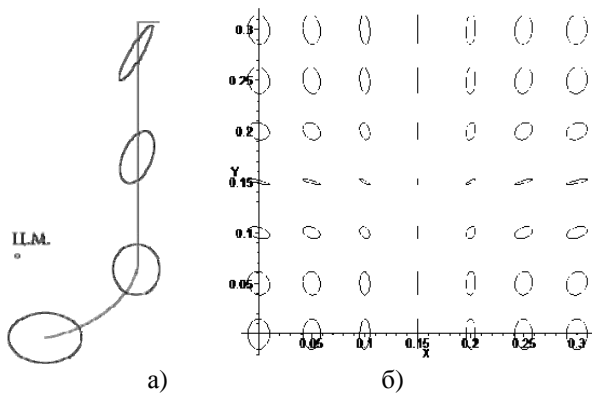


Рис. 1. Траектории движения: а) точек контейнера; б) элементов рабочей среды в различных точках контейнера

Таким образом, предлагается трехмерная схема, представленная на рис. 2. Тогда в общем случае для обоих этапов закон сохранения импульса будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} mV_n^+ - mV_n^- &= P_n, \\ mV_\tau^+ - mV_\tau^- &= P_\tau, \\ \mathcal{F}\omega^+ - \mathcal{F}\omega^- &= P_n \times R + P_\tau \times R, \end{aligned} \quad (15)$$

где  $V_n^-, V_n^+$  – нормальные составляющие скорости до и после соударения;  $V_\tau^-, V_\tau^+$  – касательные составляющие скорости до и после соударения;  $P_n, P_\tau$  – нормальный и касательный импульсы;  $\omega^-, \omega^+$  – угловая скорость до и после соударения;  $m$  – масса гранулы;  $\mathcal{F}$  – тензор момента инерции гранулы;  $R$  – радиус-вектор от центра масс к точке соударения.

Кроме того, во время контакта между гранулой и поверхностью детали возникает сила трения. Наиболее подробные исследования выбора той или иной гипотезы приведены в [13]. Указана необходимость варьировать гипотезу трения в зависимости от угла наклона. Однако, поскольку обработка происходит в большинстве случаев с использованием рабочих растворов, применяется гипотеза мокрого трения, описываемая для данного случая:

$$F_{fr} = -D|F_n|V_{Ar}, \quad (16)$$

здесь  $D$  – коэффициент трения;  $F_n$  – нормальная реакция опоры в точке соударения;  $V_{Ar}$  – касательная относительная скорость между деталью и гранулой в точке контакта, для данного случая, касательная скорость точки А.

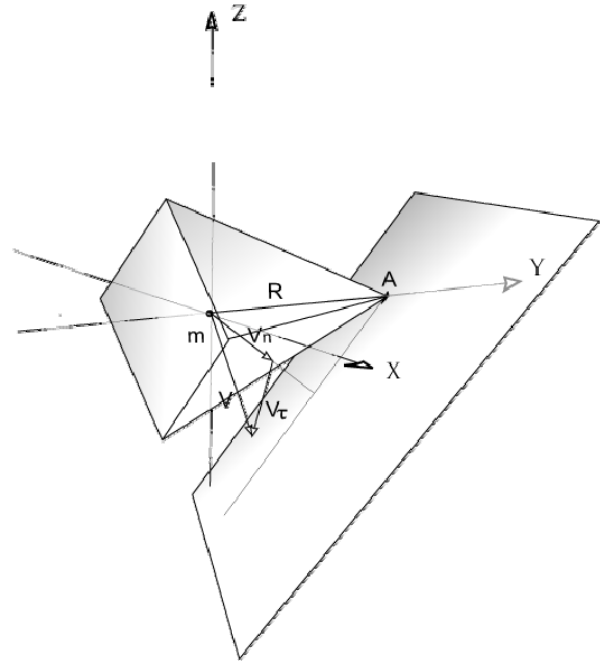


Рис. 2. Схема соударения гранулы и поверхности детали

При описании соударения двух тел, как правило, применяется гипотеза Ньютона, как наиболее простая:  $V_n^+ = kV_n^-$ , где  $k$  – коэффициент восстановления, зависящий от свойств материала. Тем не менее, если удар не центральный, а скорость имеет как нормальную, так и касательную составляющую, часть энергии перейдет во вращательное движение. Поэтому модели применимые для материальной частицы в данном случае будут неуместны т.к. определить коэффициент восстановления через отношение нормальных составляющих скорости из-за несовпадения центра масс и точки приложения импульса, в общем случае, нельзя. Наиболее корректно было бы оценивать коэффициент восстановления разницей между кинетическими энергиями тела до, и после соударения, или же применить эквивалентную гипотезу [14, 15]:

$$P_n^+ = P_n^- e; \quad (17)$$

где  $e$  – эмпирический коэффициент, характеризующий рассеяние кинетической энергии во время соударения;  $P_n^-, P_n^+$  – импульсы гранулы соответственно до и после соударения.

Т.е. процесс соударения разбивается на два этапа:

– первый этап длится до момента максимального сближения гранулы и поверхности детали, окончанием первого этапа можно считать, момент когда нормальная составляющая скорости точки А (рис. 2) становится равна 0.

– второй этап – соответственно гранула под действием силового импульса  $P_n^+$ , определяемого из (17) начинает отдаляться от поверхности.

Тогда, для первого этапа систему уравнений (15) можно расписать таким образом:

$$\begin{aligned} mV_n^0 - mV_n^- &= P_n^-; \\ mV_\tau^0 - mV_\tau^- &= P_\tau^-; \end{aligned} \quad (18)$$

где  $V_n^-, V_\tau^-$  – нормальная и касательная компоненты скорости, до соударения;  $V_n^0, V_\tau^0$  – нормальная и касательная компоненты скорости, согласно предложенному выше способу моделирования, в момент максимального сближения, гранулы и поверхности детали, т.е. значения скорости между первым и вторым этапом.

При условии, что оси координат проходят через центр масс гранулы и совпадают с ее осями симметрии, изменение моментов количества движения описывается:

$$\begin{aligned} J_x \omega_x^0 - J_x \omega_x^- &= P_n^- N_x + P_\tau^- T_x; \\ J_y \omega_y^0 - J_y \omega_y^- &= P_n^- N_y + P_\tau^- T_y; \\ J_z \omega_z^0 - J_z \omega_z^- &= P_n^- N_z + P_\tau^- T_z; \end{aligned} \quad (19)$$

здесь  $J_x, J_y, J_z$  – моменты инерции гранулы вокруг соответствующих осей;  $\omega_x^-, \omega_y^-, \omega_z^-, \omega_x^0, \omega_y^0, \omega_z^0$  – аналогично линейным скоростям, угловые скорости гранулы по соответствующим осям, в начале первого этапа и в момент максимального сближения.

Коэффициенты  $N_i$  и  $T_i$  введены для облегчения последующего решения, в частности задания начальных параметров, упрощения записи при программировании уравнения. Они представляют собой косинусы углов между направлениями импульсов и векторами, определяющими скорости точки А вокруг соответствующих осей и находятся следующим образом:

$$\begin{aligned} N_x &= \frac{1}{V_n^-} (A_z V_{ny}^- - A_y V_{nz}^-); \quad N_y = \frac{1}{V_n^-} (A_x V_{nz}^- - A_z V_{nx}^-); \\ N_z &= \frac{1}{V_n^-} (A_y V_{nx}^- - A_x V_{ny}^-); \end{aligned} \quad (20)$$

где  $A_x, A_y, A_z$ , координаты точки приложения импульса;  $V_{nx}^-, V_{ny}^-, V_{nz}^-$  – проекции нормальной

составляющей скорости на соответствующие оси;  $T_i$  – определяется аналогично, подстановкой в (20) соответствующих компонент и значений касательной составляющих скорости гранулы.

Учитывая, что силы действуют очень короткий интервал времени в течение, которого они существенно не изменяются, это позволяет при формулировании закона трения заменить их импульсами [16, 17], тогда формула (16) принимает вид:

$$P_x^- = -D |P_y^-| V_{Ar}. \quad (21)$$

Учитывая, что начальная скорость вращения гранулы значительно меньше скорости ее линейного движения, предлагается в дальнейшем не учитывать ее влияние и принять  $V_{Ar} = V_\tau^0$ .

Последнее уравнение вытекает из условий перехода, а именно: первый этап заканчивается в тот момент, когда нормальная составляющая скорости движения точки соприкосновения равна нулю, т.е.:

$$\begin{aligned} V_n^+ - \frac{V_{nx}^- (\omega_y^0 A_z + \omega_z^0 A_y) + V_{ny}^- (\omega_x^0 A_z + \omega_z^0 A_x) +}{V_n^-} \cdot \\ + \frac{V_{nz}^- (\omega_x^0 A_y + \omega_y^0 A_x)}{V_n^-} = 0 \end{aligned} \quad (22)$$

Второй этап описывается аналогичной системой:

$$\begin{aligned} mV_n^+ - mV_n^0 &= P_n^+; \\ mV_\tau^+ - mV_\tau^0 &= P_\tau^+; \\ J_x \omega_x^+ - J_x \omega_x^0 &= P_n^+ N_x + P_\tau^+ T_x; \\ J_y \omega_y^+ - J_y \omega_y^0 &= P_n^+ N_y + P_\tau^+ T_y; \\ J_z \omega_z^+ - J_z \omega_z^0 &= P_n^+ N_z + P_\tau^+ T_z; \\ P_x^+ &= -D |P_y^+| V_\tau^+ \end{aligned} \quad (23)$$

Совместно с уравнением (17) данная система позволит определить значения основных параметров движения гранулы.

Несмотря на то, что данные уравнения могут быть решены аналитически, их решение будет весьма громоздким, поэтому более уместно применить численные методы. Начальными данными, очевидно, являются масса, момент инерции тела гранулы и, разумеется, ее форма, которая определяет положение контактной точки.

Кинематические параметры буду варьироваться в зависимости от расположения детали, гранулы и угла их соударения.

Результатом исследование формы является давление, определяемое в данном случае как:

$$p = \frac{P_n^+}{S}; \quad (24)$$

где  $S$  – площадь поверхности контакта, определяемая, опять же, формой гранулы.

Дополнительной характеристикой может являться энергия, рассеиваемая при соударении, определяемая для данного случая как:

$$E = \sum_{i=x,y,z} \left( \frac{J_i \omega_i^2}{2} - \frac{J_i \omega_i'^2}{2} \right) + \frac{mV_n^2}{2} - \frac{mV_n'^2}{2} + \frac{mV_\tau^2}{2} - \frac{mV_\tau'^2}{2}. \quad (25)$$

Однако, поскольку при выборе гипотезы трения довольно сложно учесть влияние площади контакта (учитывая наличие рабочей жидкости и свойств материалов), в данном случае рассеиваемая энергия – менее характерный показатель эффективности формы гранулы.

На основе полученных теоретических результатов можно сформулировать концепцию следующего этапа моделирования – непосредственно анализа формы гранулы – исследованием значения давления в зависимости от кинематических и геометрических параметров.

Для исследования эффективности формы гранулы, помимо математической модели процесса ее взаимодействия с поверхностью детали, необходимо средство, которое позволит точно описать ее форму, а также будет использоваться для разработки нового инструмента для вибрационной обработки деталей, с инструментарием, присущим современным системам автоматизированного проектирования.

Действительно описанная выше математическая модель никаким образом не учитывает площадь контакта, определяемую формой гранулы, а также не позволяет сделать никаких выводов относительно эффективности той или иной формы, ограничиваясь лишь описанием параметров соударения.

Реализацию поставленной задачи можно разделить на следующие этапы:

1. Выбор математического метода, позволяющего учесть форму гранулы.
2. Выбор платформы для реализации данного метода, обладающей комфортными инструментами для создания нужной геометрии гранулы.
3. Выбор платформы для анализа полученных данных.
4. Моделирование процесса взаимодействия гранулы и поверхности детали.
5. Расчет параметров взаимодействия по уравнениям (15-23).
6. Анализ и визуализация полученных данных.

Выбор математического метода не является очевидной задачей. Перемещаясь в контейнере, гранула за время обработки совершает огромное количество соударений разными геометрическими элементами (гранями и ребрами) и с разной скоростью. Таким образом, необходимо определить

некое усредненное значение удельного импульса, передаваемого от гранулы к детали.

Соответственно гранулы, способные передавать максимальный импульс в течение обработки, обладают наиболее предпочтительными характеристиками формы при прочих равных параметрах.

Необходимость получения некоего среднего значения приводит задачу к необходимости многократных численных испытаний, что, в свою очередь, подразумевает дискретизацию входных параметров для каждого испытания или какие-то другие ограничивающие рамки.

Основные одновременно варьируемые параметры – это: начальная скорость, углы падения гранулы на обрабатываемую поверхность, а также расположение самой поверхности относительно осей (рис. 2), на основании которых вычисляется площадь пятна контакта.

Таким образом, какие бы то ни было методы последовательного перебора всех параметров упираются в необходимость выбора шага изменения данных параметров, что даже при высоком разрешении приведет либо к избыточности, либо к погрешности, связанной с дискретизацией. Кроме того, сложно подобрать алгоритм изменения параметров, рационально и точно подходящий для гранулы любой формы. Необходимо учитывать, что для каждого набора параметров необходимо решать систему (18, 19, 23), что также мешает максимально уменьшить разрешение дискретизации.

В связи с этим предлагается использовать метод Монте-Карло (ММК) – генерировать множество случайных комбинаций, наиболее адекватно соответствующих реальному изменению параметров. Данный стохастический подход позволит максимально, в сравнении с прочими, приблизить численное моделирование к реальному процессу. Основная сложность заключается в выборе адекватного распределения математических величин.

В основе выбора программной платформы для реализации данной задачи лежит необходимость обеспечить комфортную разработку трехмерной модели гранулы, а также возможность ее последующей модификации. Т.е. речь идет о системе автоматизированного проектирования (САПР), включающей в себя средства постпроцессинга и расширяемой за счет интегрированной среды разработки. Это значительно ограничивает диапазон приемлемых программных продуктов.

Из САПР с интегрированными средствами разработки можно выделить следующие: линейка продуктов фирмы Autodesk; система Open Salome от Open CASCADE SAS; BRL-CAD.

А также отечественные и зарубежные продукты на основе ядра Parasolid, Siemens PLM Software.

Наиболее приемлемой, согласно поставленным требованиям, а также с учетом субъективных предпочтений и навыков является система AutoCAD, Autodesk.

Несмотря на проприетарную лицензию, данная система обладает эргономичным интерфейсом, наиболее привычным для западного и отечественного инженеринга. Это позволит использовать разработанные в данной работе программы не только для исследований, но и на производстве, например на предприятиях, изготавливающих шлифовальный инструмент. Кроме того, система включает в себя относительно мощную и одновременно простую встроенную систему разработки, позволяющую реализовать необходимые в данной статье задачи, а также свободную интеграцию с другими программными средствами.

Кроме того, система встроенными средствами вычисления таких параметров трехмерных объектов, как: объем, координаты центра масс, моменты инерции и прочее, кроме того средства разработки позволяют просто, в сравнении с другими программными продуктами, выполнять различные геометрические преобразования.

Задача обработки полученных данных не является принципиальной в данном комплексе и может быть реализована любым приемлемым средством. AutoCAD таковым не является. Задачи, связанные с обработкой и визуализацией данных, решать на его базе не рационально. Однако он обладает средствами интеграции с приложениями Microsoft Office. Поэтому в качестве наиболее подходящего инструмента хранения и последующего анализа данных можно использовать Microsoft Excel.

Это рационально еще и по той причине, что Microsoft Excel может выступать как источник данных для последующей их передачи в систему компьютерной алгебры, в которой реализовано решение задачи соударения единичной гранулы и поверхности детали. Желательно, чтобы решение было получено в аналитическом виде или же численные функции были оптимизированы достаточно для обработки большого числа начальных данных, т.е. использованы как одно из звеньев в цепочке многократных испытаний ММК.

Далее результаты возвращаются обратно в Excel для получения и визуализации конечных результатов обработки статистики, что может быть проиллюстрировано следующей схемой (рис. 3).

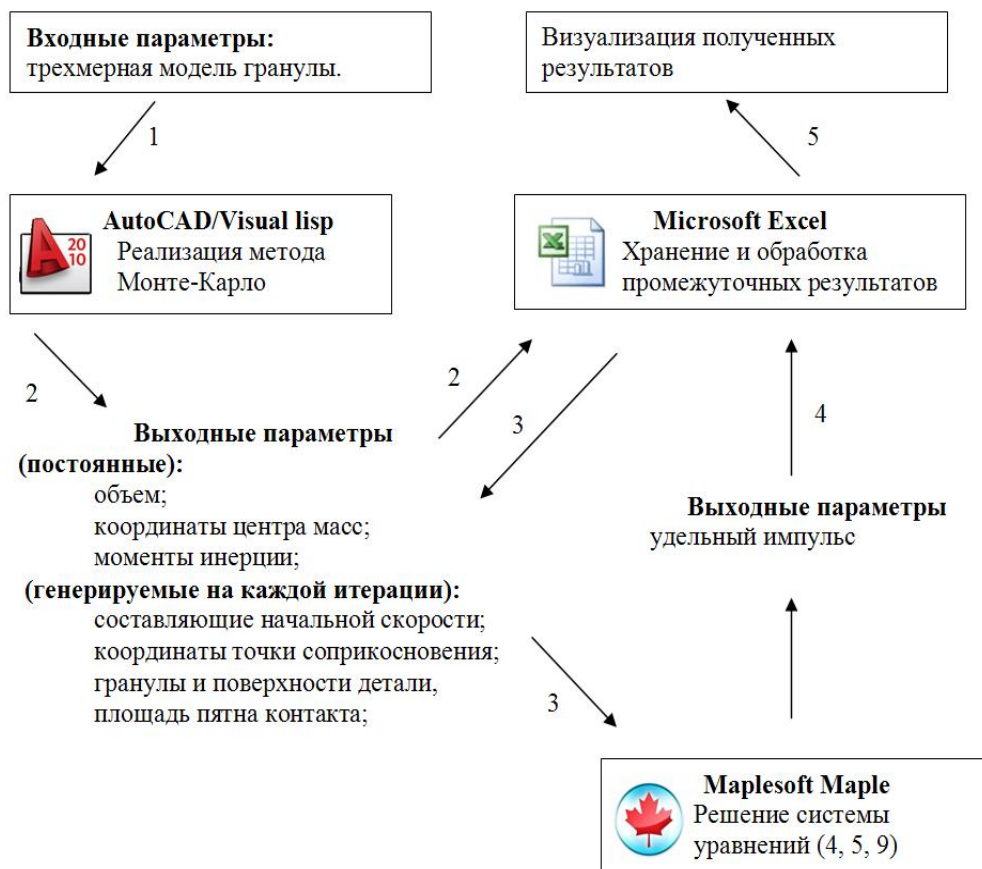


Рис. 3. принцип взаимодействия компонентов программного комплекса для проектирования и исследования эффективности формы гранулы: 1 – построение гранулы в системе autocad; 2 – передача результатов работы ммк в excel; 3 – экспорт данных из excel в maple для определения удельного импульса; 4 – сохранение данных в excel; 5 – получение среднего значения, анализ результатов

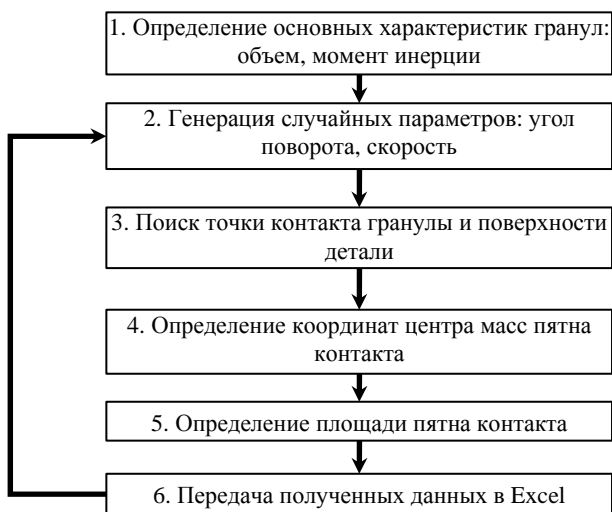


Рис. 4. Алгоритм работы компонента программы в AutoCAD

AutoCAD является инструментом для создания модели гранулы. Далее необходимо получить статистику ее соударений с гипотетической поверхностью. Для этого предлагается реализовать следующий алгоритм (рис. 4).

При создании программ в среде AutoCAD в распоряжении разработчика есть несколько инструментов: ObjectARX - среда разработки, состоящая из библиотек, включающих в себя программные интерфейсы для разработчиков, которые позволяют настраивать и видоизменять среду AutoCAD, предоставляя наиболее гибкие функции, затрагивающие непосредственно архитектуру приложения. Именно на базе этой технологии созданы основные ответвления, такие, например, как AutoCAD Architecture, AutoCAD Mechanical.

VBA (Visual Basic for Applications) – наиболее простой и стандартный путь автоматизации и разработки приложений в среде AutoCAD. Однако в данный момент VBA поддерживается в данной среде не официально и не входит в дистрибутивы. Программы, написанные с его помощью, обладающей высокой скоростью благодаря технологии ActiveX, в то же время лишены каких-либо преимуществ, связанных с наличием функций для удобной работы с геометрическими задачами.

Visual LISP – инструмент для разработки приложений в среде AutoCAD, представляющий собой диалект языка LISP со встроенными функциями, необходимыми для комфортного решения задач автоматизации. Обладает всеми преимуществами технологии ActiveX, доступными VBA, и не требует детального ознакомления с архитектурой приложения и программированием, как технология ObjectARX. Кроме того Autodesk планируют поддерживать данный инструмент и в дальнейших версиях, что гарантирует совместимость.

Таким образом, Visual LISP становится средством реализации алгоритма, представленного на рис. 4.

После того, как пользователь создает модель гранулы, основная задача данной программы – определить площадь пятна контакта, а также параметры соударения и передать их для дальнейшей обработки.

При разработке приложений в Visual LISP существуют три основных метода, позволяющие организовать доступ к объекту на чертеже:

- программный запуск команд AutoCAD (наиболее медленный, однако наиболее простой с точки зрения разработки метод);

- использование команд доступа к данным DXF (наиболее старая и гибкая технология, которая, тем не менее, не является самой быстрой);

- ActiveX – технология от Microsoft, появившаяся в AutoCAD с приходом VBA. Позволяет наиболее быстро оперировать объектами, доступ к которым осуществляется по средствам привычной на сегодняшний день иерархии объектов, а также их методов, свойств и событий, имеющихся во всех объектно-ориентированных языках программирования.

Таким образом, учитывая, что одним из важных критериев при реализации метода Монте-Карло является скорость, целесообразно использовать технологию ActiveX.

Во втором пункте алгоритма (рис. 4) генерируются значения углов поворота вокруг каждой из трех осей. При этом распределение генератора случайных чисел принимается как равномерное в диапазоне  $(0, \pi)$ .

Составляющие  $V_x, V_y, V_z$  скорости соударения генерируются по нормальному распределению, исходя из условия:  $V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$  должно находиться в диапазоне  $(2V_{cp} - V_{max}, V_{max})$ . Данный параметр влияет на глубину проникновения вершин зерен абразива в поверхность детали, т.е., по сути, в рамках разработанной модели на площадь контакта.

Третий пункт алгоритма - наложение поверхности на модель гранулы с целью определения площади контакта. Следует отметить, что данная задача не решается стандартными средствами AutoCAD и Visual LISP и для ее решения была специально разработана рекурсивная функция. Функция представляет собой, по сути, метод двоичного поиска (рис. 5), который на задачах данного типа работает значительно быстрее, чем метод линейного поиска.

Изначально деталь ориентируется случайным образом, далее плоскость располагается перпендикулярно оси X на расстоянии, заведомо превышающем радиус сферы, описанной около гранулы (рис. 5 а).

Далее плоскость размещается на расстоянии, составляющем половину расстояния от предыдущей итерации, и проверяется наличие коллизии. Если

коллизии нет, то операция повторяется, отрезок снова делится на две части (рис 5 б).

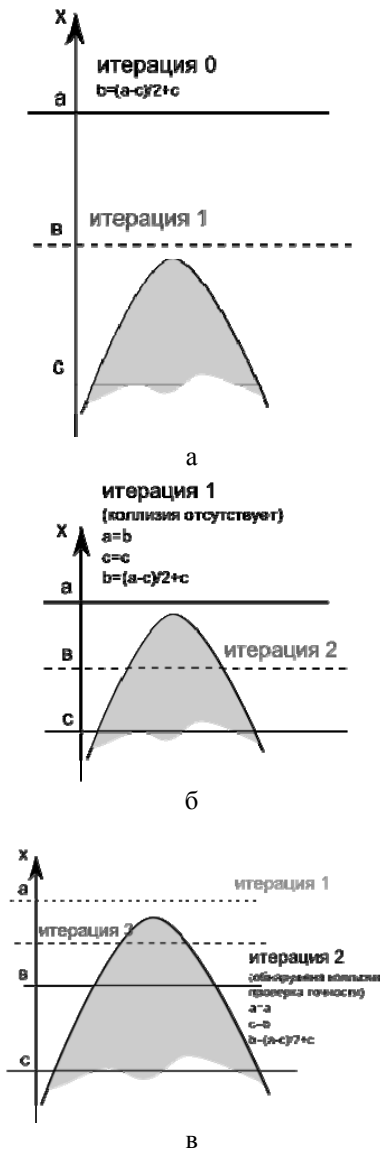


Рис. 5. Пример метода двоичного поиска коллизий

Если коллизия имеет место, то проверяется, соответствует ли сдвиг на данной итерации заданной точности, если нет, то, соответственно, функция снова запускается (рис 5 в).

Далее фиксируются координаты и площадь пятна контакта, которые передаются для дальнейшей обработки.

Количество испытаний, используемое при численных исследованиях, составляло 20000. Точность соответствовала – 0,2 мм.

Были смоделированы гранулы следующих типов: конус, пирамида, в основании которой лежит квадрат – П4 и пирамида, в основании которой лежит невыпуклый шестиугольник – П6. Результаты приведены в табл. 2. На основе полученных теоретических результатов можно сформулировать

концепцию следующего этапа исследований – этапа моделирования – непосредственно анализа формы гранулы исследованием значения давления в зависимости от кинематических и геометрических параметров.

Таблица 2

Результаты расчетов показателей, характеризующих эффективность гранул различной формы

Форма гранулы	Конус	П4	П6
Средний импульс, м·кг/с	0,0009	0,0011	0,0020

**Материалы и результаты исследований.** В работе [5] приведены результаты экспериментальных исследований по определению съема металла с поверхностей образцов, выполненных из латуни, стали и алюминия. Исследования были проведены при использовании абразивных гранул в форме: конусов, П4 и П6. При этом, как указывается в работе [5], все образцы были обработаны в гранулах имеющих одинаковый состав (шлифовальный порошок карбид кремния черный зернистостью №40 и эпоксидное связующее), длину образующей (20 мм) и примерно одинаковую массу (10 г), что при проведении экспериментов позволило исключить влияние этих параметров на эффективность процесса. При проведении экспериментальных исследований использовался вибрационный станок модели УВИ-25, а обработка образцов проводилась при режимах: амплитуда колебаний контейнера A=3 мм и частота колебаний ω=65 Гц. Масса загрузки составляла 75 % от объёма контейнера. Результаты экспериментальных исследований сведен в табл. 3.

Анализ данных, приведенных в табл. 3 показывает, что зависимость съема металла с поверхностей образцов от времени  $Q(t)$  имеет характер «насыщения» (т.е. величина съема металла устанавливается со временем и затем практически не изменяется). В работе [6] указано, что зависимости с «насыщением» могут быть описаны как экспоненциальные, а именно, в рассматриваемом случае исследуемая зависимость имеет вид [6] (значения констант A и B могут быть найдены при помощи графических построений – рис. 6):

$$Q(t) = A \cdot (1 - e^{-Bt}), \tag{26}$$

где A – константа, равная устанавливаемому с течением времени значению R; B – константа, обратное значение, которое принято называть постоянной времени.

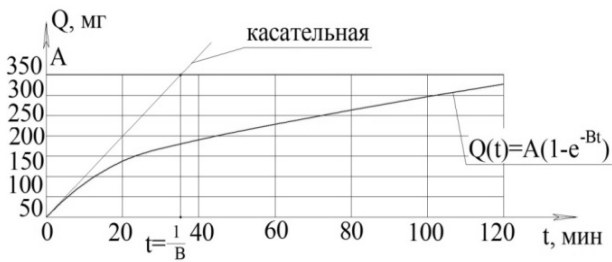


Рис. 6. К определению констант А и В для (26)

Для большей достоверности полученных результатов, а так же для предоставления возможности их использования для сравнения с результатами других авторов в случае определения съема металла следует перейти к его удельному значению, а именно к съему металла с единицы площади исследуемого образца. Для этого полученные средние значения съема металла

следует разделить на суммарную площадь всех поверхностей образца:

$$Q_s = \frac{Q}{S}, \quad (27)$$

где  $Q_i$  – съем металла на каждом отрезке времени обработки, г;  $S$  – суммарная площадь всех обрабатываемых поверхностей образца.

Результаты расчетов данных, сведенных в табл. 3 по зависимости (27) сведем в табл. 4–6. Значения констант А и В найдем при помощи графических построений согласно методике, приведенной на рис. 6.

Таблица 3

Съем металла с поверхностей исследуемых образцов, г

Время обработки, мин	Латунь ЛС 59-1Л			Сталь 3			Алюминий АЛ 9		
	Конус	П4	П6	Конус	П4	П6	Конус	П4	П6
30	0,024	0,026	0,025	0,039	0,049	0,051	0,050	0,053	0,059
60	0,048	0,052	0,049	0,078	0,100	0,102	0,100	0,105	0,118
90	0,073	0,076	0,074	0,116	0,150	0,166	0,140	0,148	0,162
120	0,097	0,101	0,117	0,183	0,208	0,229	0,180	0,190	0,206
150	0,124	0,135	0,145	0,245	0,262	0,312	0,238	0,248	0,268
180	0,151	0,158	0,179	0,307	0,353	0,395	0,295	0,306	0,329
210	0,185	0,199	0,213	0,397	0,426	0,478	0,348	0,363	0,390
240	0,219	0,225	0,258	0,459	0,476	0,529	0,401	0,419	0,452

Таблица 4

Удельный съем металла с единицы площади латунных образцов в форме параллелепипедов 20×10×10 мм, г/мм<sup>2</sup>, ×10<sup>-5</sup>

Время, мин	Конус			П4			П6		
	Э	А	%	Э	А	%	Э	А	%
30	4,26	4,81	-12,91	5,04	5,14	-1,98	6,55	7,27	-10,99
60	7,79	8,57	-16,22	8,14	9,11	-11,92	10,84	12,51	-15,41
90	9,39	10,51	-13,10	10,67	12,17	-14,06	14,02	16,29	-16,19
120	11,72	13,81	-17,83	12,89	14,53	-12,72	16,81	19,00	-13,03
150	14,01	15,60	-11,35	15,39	16,35	-6,24	19,29	20,96	-8,66
180	16,16	17,00	-5,20	17,58	17,76	-1,02	21,50	22,37	-4,05
210	18,91	18,09	4,34	19,98	18,84	5,71	23,74	23,39	1,47
240	21,78	20,95	3,81	22,45	21,68	3,43	25,64	25,12	2,03

Таблица 5

Удельный съём металла с единицы площади стальных образцов в форме пластин 50×40×5 мм, г/мм<sup>2</sup>, ×10<sup>-5</sup>

Время, мин	Конус			П4			П6		
	Э	А	%	Э	А	%	Э	А	%
30	2,67	2,99	-16,21	3,09	3,29	-6,17	2,99	3,19	-19,98
60	3,73	3,29	11,70	4,59	3,89	15,32	4,41	5,43	-20,06
90	4,69	5,49	-17,00	5,62	6,40	-13,96	5,57	6,39	-20,60
120	5,71	6,680	-12,13	6,47	7,53	-14,12	6,54	7,57	-20,08
150	6,87	7,67	-11,39	7,39	8,18	-12,81	7,67	8,90	-16,08
180	7,529	8,639	-14,75	8,16	9,758	-19,54	8,68	9,72	-12,00
210	8,429	9,087	-7,80	8,94	10,19	-14,09	9,75	9,22	5,47
240	9,357	9,387	-0,33	9,72	10,48	-7,78	10,79	10,52	2,52

Таблица 6

Удельный съём металла с единицы площади алюминиевых образцов в форме пластин 50×40×5 мм, г/мм<sup>2</sup>, ×10<sup>-5</sup>

Время, мин	Конус			П4			П6		
	Э	А	%	Э	А	%	Э	А	%
30	2,048	1,7034	16,83	2,5869	2,9266	-13,13	2,7691	3,264	-17,86
60	3,193	3,547	-11,09	3,6319	4,0015	-10,18	3,8955	4,406	-13,11
90	4,000	4,904	-22,61	4,4206	5,2342	-18,40	4,6882	5,813	-23,98
120	4,854	5,362	-10,46	5,2624	6,1336	-16,56	5,4660	6,736	-23,23
150	5,737	6,246	-8,87	6,000	6,7405	-12,34	6,2888	7,342	-16,75
180	6,571	6,795	-3,41	6,8641	7,15	-4,17	7,2641	8,739	-20,31
210	7,510	7,917	-5,41	7,7839	7,4264	4,59	8,1488	9,001	-10,46
240	8,188	8,102	1,04	8,5551	8,6129	-0,68	9,2163	9,172	0,48

Проведенные расчеты позволили выявить зависимости для определения съема металла с поверхностей деталей, выполненных из латуни (зависимости 28–30), стали (зависимости 31–33) и алюминия (34–36) от времени при их обработке гранулами различных геометрических форм:

– латунь

$$Q(t)_{\text{конус}} = 0,22 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - e^{-0,00823 \cdot t}), \quad (28)$$

$$Q(t)_{\text{П4}} = 0,225 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - e^{-0,00865 \cdot t}), \quad (29)$$

$$Q(t)_{\text{П6}} = 0,26 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - e^{-0,01094 \cdot t}), \quad (30)$$

– сталь

$$Q(t)_{\text{конус}} = 0,095 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - e^{-0,01263 \cdot t}), \quad (31)$$

$$Q(t)_{\text{П4}} = 0,10 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - e^{-0,0133 \cdot t}), \quad (32)$$

$$Q(t)_{\text{П6}} = 0,11 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - e^{-0,01454 \cdot t}), \quad (33)$$

– алюминий

$$Q(t)_{\text{конус}} = 0,085 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - e^{-0,01276 \cdot t}), \quad (34)$$

$$Q(t)_{\text{П4}} = 0,090 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - e^{-0,01311 \cdot t}), \quad (35)$$

$$Q(t)_{\text{П6}} = 0,095 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - e^{-0,01403 \cdot t}). \quad (36)$$

Исследования влияния различной формы абразивных гранул, а именно: конусов, пирамид,

имеющих в основании квадрат, невыпуклые шестиугольник, на производительность процесса вибрационной обработки показали, что при использовании гранул, имеющих выступающие ребра, съём металла увеличивается с увеличением количества этих ребер. По сравнению с конусами в гранулах П4 этот рост составляет соответственно 2–12 %, в П6 – 13–24 %.

Сравнение данных, полученных путем аппроксимирования, с экспериментальными данными показывает их хорошую согласованность между собой (большую погрешность для малых значений времени можно объяснить тем, что в начале обработки идет сглаживание острых кромок заготовок). Из результатов исследований, приведенных в табл. 2–4 видно, что значения, полученные в ходе экспериментальных исследований, и в результате их аппроксимации отличаются на 0,5–20 %, что является незначительным. Таким образом, экспоненциальные зависимости могут быть рекомендованы для применения в инженерной практике.

### Результаты исследования

Разработан алгоритм, позволяющий с помощью математического метода Монте-Карло, опираясь на полученную математическую модель, проанализировать эффективность применения

гранулы той или иной формы в условиях взаимодействия гранулы и детали, максимально близких к реальным. На основе данного алгоритма разработана методика, реализованная как программный комплекс, состоящий из модуля в среде AutoCAD и программы в системе компьютерной алгебры MAPLE, а также Microsoft Excel, позволяющая анализировать эффективность формы гранулы. Данная система может быть использована как для исследования свойств существующих гранул, так и для разработки новых.

Исследования влияния различной формы абразивных гранул, а именно: конусов, пирамид, имеющих в основании квадрат, невыпуклые шестиугольник, на производительность процесса вибрационной обработки показали, что при использовании гранул, имеющих выступающие ребра, съем металла увеличивается с увеличением количества этих ребер. По сравнению с конусами в гранулах П4 этот рост составляет соответственно 2–12 %, в П6 – 13–24 %.

Сравнение данных, полученных путем аппроксимирования, с экспериментальными данными показывает их хорошую согласованность между собой (большую погрешность для малых значений времени можно объяснить тем, что в начале обработки идет сглаживание острых кромок заготовок). Из результатов исследований, приведенных в табл. 2–4 видно, что значения, полученные в ходе экспериментальных исследований, и в результате их аппроксимации отличаются на 0,5–20 %, что является незначительным. Таким образом, экспоненциальные зависимости могут быть рекомендованы для применения в инженерной практике.

### Выводы

1. Анализ результатов исследований существующих математических моделей, описывающих влияние на производительность процесса вибрационной обработки формы абразивных гранул, показал наличие большого количества противоречий. Авторы исследуемых в статье работ, при написании математических моделей рассматривают максимально плотную укладку гранул по поверхностям обрабатываемых образцов в статике, что приводит к неадекватному определению величины съема металла, т. к. укладка гранул по поверхностям обрабатываемых деталей в динамике значительно отличается от максимально плотной укладки в статике.

2. Разработана трехмерная математическая модель, описывающая взаимодействие гранулы и поверхности изделия, позволяющая учесть особенности формы гранулы.

3. Результаты экспериментальных и теоретических исследований съема металла с поверхностей образцов, выполненных из латуни марки ЛС 59-1Л, алюминия АЛ-9 и стали 3 показали, что наибольший съем металла

наблюдается при обработке образцов в гранулах в форме пирамиды, в основании которой лежит невыпуклый шестиугольник, так по сравнению с конусами в гранулах П4 он больше соответственно на 2–12 % и в П6 на 13–24 %.

4. Расчет съема металла по полученным зависимостям показал хорошую сходимость результатов экспериментальных и теоретических исследований. Применение в инженерной практике полученных в работе зависимостей позволит спрогнозировать производительность процесса вибрационной обработки деталей в принятых при исследованиях пределах и разработать рекомендации по использованию той или иной формы гранул для обработки деталей из латуни ЛС 59-1Л, алюминия АЛ-9 или стали 3.

### Литература

1. Венцкевич Г.В. Влияние некоторых параметров абразивного наполнителя на эффективность процесса шлифования в вибрирующих резервуарах: дис... канд. техн. наук / Гжегож Венцкевич. – Одесса, 1986. – 175 с.
2. Литовка Г.В. Вероятностно-статистическая система геометрических параметров гранул абразивного наполнителя как научная основа управления показателями вибрационной обработки: дис... доктора техн. наук: 05.02.08, 05.03.01 / Геннадий Васильевич Литовка. – Благовещенск, 1996. – 364 с.
3. Бранспиз Е.В. Повышение эффективности виброабразивной обработки путем рационального выбора ее основных параметров: дис... канд. техн. наук: 05.03.01 / Бранспиз Елена Владимировна. – Луганск, 2002. – 265 с.
4. Шумакова Т.А. К объяснению влияния геометрии абразивных гранул на производительность процесса вибрационной обработки / Л.М. Лубенская, С.Н. Ясуник, Т.А. Шумакова // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського – Кременчук: КДПУ, 2009. – Вип. 2/2009(55) частина 1. – С. 56-59.
5. Попов С. П. Интенсификация процесса виброабразивной обработки за счет углов колебаний и поджатия рабочей среды [Текст]: автореф. дис. ... кандидата техн. наук: спец. 05.02.08 / С. П. Попов. – Технология машиностроения. – Воронеж: ВГТУ, 1994. – 16 с.
6. Шумакова, Т. А. Повышение производительности обработки деталей в вибрирующих контейнерах путем выбора формы инструмента: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Т. А. Шумакова. – Харьков, 2010. – 244 с.
7. Николаенко А.П. Обоснование выбора математической модели процесса вибрационной упрочняющей обработки / А.П. Николаенко, М.А. Калмыков // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2008. – № 5/4(35). – С. 53 – 57.
8. Бабичев А.П. Основы вибрационной технологии / А.П. Бабичев, И.А. Бабичев. – Ростов-на-Дону, 2008. – 694 с.
9. Мельникова Е.П. Обобщенная аналитическая модель съема слоя материала детали при финишных методах

- обработки / Е.П. Мельникова // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «машинобудування і машинознавство», 2004. – Вип. 71. – С. 47-55.
10. Лубенская Л.М. Особенности энергетических процессов в деформируемых рабочих средах при обработке деталей в вибрирующих контейнерах: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Лубенская Людмила Михайловна. – Луганск: ЛМСИ, 1992 – 203 с.
  11. Калмыков М.А. Повышение эффективности процесса вибрационной обработки крупногабаритных изделий: дис... канд. тех. наук / Калмыков Михаил Александрович. – Харьков, 2005. – 223 с.
  12. Сивко В.И. Основы механики вибрируемой бетонной смеси. – Киев: Вища школа, 1980. – 408 с.
  13. Копылов Ю.Р. Динамика процесса и технология виброударного упрочнения деталей сложной формы: дис. ... доктора техн. наук / Ю.Р. Копылов. – Воронеж, 1990. – 387 с.
  14. Fluid Simulation for Computer Graphics, R. Bridson, A K Peters, 2008.
  15. PEREZ J.P., Mécanique : points matériels - solides - fluides, Masson, 1995.
  16. Robust treatment of collisions, contact and friction for cloth animation, R. Bridson, R. Fedkiw and J. Anderson, ACM Transactions on Graphics, vol. 21, no. 3, Proc. ACM SIGGRAPH 2002, pp. 594-603.
  17. Mamalis, A. G. Mathematical simulation of motion of working medium at finishing–grinding treatment in the oscillating reservoir [Text] / A. G. Mamalis, A. V. Mitsyk, A. I. Grabchenko, V. A. Fedorovich // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2013. – Vol. 70. Issue 1-4. – P. 1–14. doi: 10.1007/s00170-013-5257-6
  8. Babychev A.P. Osnovi vybracyonnoj tehnologii / A.P. Babychev, Y.A. Babychev. – Rostov-na-Donu, 2008. – 694 s.
  9. Melnikova E.P. Obobshchennaya analiticheskaya model s'ema sloya materiala detali pri finishnyih metodah obrabotki / E.P. Melnikova // Naukovi pratsi Donetskogo natsionalnogo tehnicnogo universitetu. Seriya «Mashinobuduvannya i mashinoznavstvo», 2004. – Vip. 71. – S. 47-55.
  10. Lubenskaya L.M. (1992) Osobennosti energeticheskikh protsessov v deformiruemyyih rabochih sredah pri obrabotke detaley v vibriruyuschih konteynerah. Lugansk, 203 s.
  11. Kalmykov M.A. (2005) Povyshenie effektivnosti protsesssa vibratsionnoy obrabotki krupnogabaritnyih izdeliy. Kharkiv, 223 s.
  12. Sivko V.I. Osnovyi mehaniki vibriruemoy betonnoy smesi. – Kiev: Vischa shkola, 1980. – 408 s.
  13. Kopyilov Yu.R. (1990). Dinamika protsesssa i tehnologiya vibroudarnogo uprochneniya detaley slozhnoy formy. Voronezh, 387 s.
  14. Fluid Simulation for Computer Graphics, R. Bridson, A K Peters, 2008.
  15. PEREZ J.P., Mécanique: points matériels - solides - fluides, Masson, 1995.
  16. Robust treatment of collisions, contact and friction for cloth animation, R. Bridson, R. Fedkiw and J. Anderson, ACM Transactions on Graphics, vol. 21, no. 3, Proc. ACM SIGGRAPH 2002, pp. 594-603.
  17. Mamalis, A. G. Mathematical simulation of motion of working medium at finishing–grinding treatment in the oscillating reservoir [Text] / A. G. Mamalis, A. V. Mitsyk, A. I. Grabchenko, V. A. Fedorovich // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2013. – Vol. 70. Issue 1-4. – P. 1–14. doi: 10.1007/s00170-013-5257-6

### References

1. Ventskevich, J. (1986). Vliianie nekotoryh parametrov abrazivnogo napolnitelia na effektivnost' protsesssa shlifovaniia v vibriruyushchih rezervuarah. Odessa, 175.
2. Litovka, G.V. (1996) Veroyatnostno-statisticheskaya sistema geometricheskikh parametrov granul abrazivnogo napolnitelya kak nauchnaya osnova upravleniya pokazatelyami vibratsionnoi obrabotki. Blagoveschensk, 364 с.
3. Branspiz, E. V. (2002). Povyshenie effektivnosti vibroabrazivnoi obrabotki putem ratsional'nogo vybora ee osnovnyh parametrov. Kharkiv, 265.
4. Shumakova T.A. (2009). K obyasnenuyi vliyaniya geometrii abrazivnyih granul na proizvoditel'nost protsesssa vibratsionnoy obrabotki / L.M. Lubenskaya, S.N. Yasunik, T.A. Shumakova // VIsnik Kremenchut'skogo derzhavnogo politehnicnogo universitetu iImeni Mihayla Ostrogradskogo – Kremenchuk: KDPU, 2009. – Vip. 2/2009(55) chastina 1. – S. 56-59.
5. Popov, S. P. (1994). Intensifikatsiia protsesssa vibroabrazivnoi obrabotki za schet uglov kolebaniy i podzhatiia rabochei sredy. Voronezh: VGTU, 16.
6. Shumakova, T. A. (2010). Povyshenie proizvoditel'nosti obrabotki detaley v vibriruyushchikh konteynerakh putem vybora formy instrumenta. Kharkiv, 244.
7. Nikolaenko A.P. Obosnovanie vybora matematicheskoy modeli protsesssa vibratsionnoy uprochnyayushey obrabotki / A.P. Nikolaenko, M.A. Kalmykov // Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovyih tehnologiy. – 2008. – # 5/4(35). – S. 53 – 57.

### Шумакова Т.О. Аналіз математичних моделей процесу вібраційної обробки по визначенню зміння металу з урахуванням форми абразивного інструменту

У статті наведено результати аналізу математичних моделей, що описують процес вібраційної обробки деталей. У ході теоретичних і експериментальних досліджень був введений ряд залежностей, що дозволяють на етапі проектування технологічних процесів вібраційної обробки деталей в середовищі вільних абразивів визначити найбільш раціональну форму інструмента. Отримані залежності зміння металу в одиницю часу показують, що він досягає максимального значення при обробці зразків зі сталі, латуні та алюмінію в гранулах, які мають максимальну кількість ребер – це гранулу у формі піраміди, в основі якої лежить неопуклі шестикутник.

**Ключові слова:** вібраційна обробка, інструмент, абразивна гранула, математичне моделювання.

### Shumakova T. Analysis of mathematical models of the process of vibratory processing for determining metal removal rates with regard to the shape of the abrasive tool

It was found in the article that the most authors when writing mathematical models consider most dense packing of the granules on the treated samples surfaces in static. It leads to an incorrect determination of the amount of metal removal, since the laying pellets in the dynamics is significantly different from most dense styling in statics. The use of Monte Carlo and CAD complex allowed us to develop three-dimensional mathematical model describing the interaction

*between the pellets and the product surface taking into account the specific form of pellets. As a result of mathematical modeling it was established that the most productive are the granules in the form of pyramids, which lies at the base of nonconvex hexagon. Approssimativnye experimental results of metal removal from the surfaces of brass, steel and aluminum samples allowed us to bring a number of dependencies, which, at the design stage of vibration processing technological processes, it is possible to determine the most rational form of the instrument. Calculation of metal removal on the obtained dependencies showed good agreement with the results of experimental and theoretical studies.*

**Keywords:** vibration treatment, tool, abrasive granule, mathematical modeling.

**Шумакова Тетяна Олександрівна** – к.т.н., доцент кафедри машинобудування, верстатів та інструментів, Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, [shumakovatatyana@yandex.ua](mailto:shumakovatatyana@yandex.ua)

*Рецензент:* **Соколов В.І.**, д.т.н., професор

Стаття подана 10.11.2015.

**ВІСНИК  
СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО  
УНІВЕРСИТЕТУ  
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ  
№ 5 (222) 2015**

**Науковий журнал**

Відповідальний за випуск Соколов В.І.

Оригінал-макет Могильна О.В.

**Статті надруковано в авторській редакції**

Підписано до друку 05.12.2015 р.  
Формат 60 x 84 1/8. Папір офсетний. Гарнітура Times.  
Друк офсетний. Умов. друк. арк. 18,2. Обл. друк. арк. 19,8.  
Наклад 300 прим. Вид. № 3039. Ціна вільна.

Видавництво  
Східноукраїнського національного університету  
імені Володимира Даля

Свідоцтво про реєстрацію: серія ДК № 1620 від 18.12.03 р.

**Адреса університета:** просп. Радянський 59-а  
м. Северодонецьк, 93400, Україна  
**E-mail:** [vidavnictvoSNU.ua@gmail.com](mailto:vidavnictvoSNU.ua@gmail.com)

**Надруковано у типографії Мадрид, ООО**  
Свідоцтво про реєстрацію: ДК №4399 від 27.08.2012.  
Адреса типографії: вул. Ольминського, 11,  
м. Харків, 61024, Україна  
e-mail: : info@madrid.in.ua