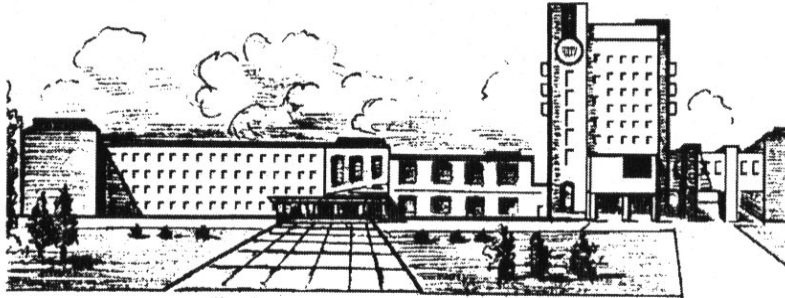


ISSN 2411-5363 (print)
ISSN 2519-4569 (online)

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧЕРНІГІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**



ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

№ 1 (15)

Чернігів 2019

Друкується за рішенням вченої ради Чернігівського національного технологічного університету (протокол № 3 від 25.03.2019 р.). Науковий журнал «Технічні науки та технології» внесено до переліку наукових фахових видань України, затвердженого Наказом Міністерства освіти і науки України від 28.12.2017 р. № 1714.

Технічні науки та технології : науковий журнал / Чернігів. нац. технол. ун-т. – Чернігів : Т38 ЧНТУ, 2019. – № 1 (15). – 290 с.

У цьому випуску журналу «Технічні науки та технології» вміщено статті, присвячені теоретичним та експериментальним дослідженням у науковому напрямі «Технічні науки»: механічна інженерія, електрична інженерія, інформаційні технології, хімічна та біоінженерія, виробництво та технології, архітектура та будівництво. Статті прорецензовані провідними вченими у відповідних галузях знань.

Журнал «Технічні науки та технології» буде корисним для науковців, науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та студентів технічних спеціальностей закладів вищої освіти.

УДК 62:67.05

Головний редактор:

Казимир В. В., доктор технічних наук, професор, Чернігівський національний технологічний університет.

Заступник головного редактора:

Сапон С. П., кандидат технічних наук, доцент, Чернігівський національний технологічний університет.

Члени редакційної колегії:

Прикладна механіка, матеріалознавство та машинобудування

Бойко С. В., кандидат технічних наук, доцент, Чернігівський національний технологічний університет;
Болотов Г. П., доктор технічних наук, професор, Чернігівський національний технологічний університет;
Дубенець В. Г., доктор технічних наук, професор, Чернігівський національний технологічний університет;
Єрошенко А. М., кандидат технічних наук, доцент, Чернігівський національний технологічний університет;
Кальченко В. І., доктор технічних наук, професор, Чернігівський національний технологічний університет;
Кальченко В. В., доктор технічних наук, професор, Чернігівський національний технологічний університет;
Новомлинець О. О., доктор технічних наук, професор, Чернігівський національний технологічний університет;
Пилипенко О. І., доктор технічних наук, професор, Чернігівський національний технологічний університет.

Інформаційно- комп'ютерні технології

Азаров О. Д., доктор технічних наук, професор, Вінницький національний технічний університет;
Вархола Міхал, доктор технічних наук, професор, Технічний університет в Кошице (Словаччина);
Джон Н. Девис, доктор технічних наук, професор, університет Глиндор, Рексем, Великобританія;
Зайцев С. В., доктор технічних наук, доцент, Чернігівський національний технологічний університет;
Литвинов В. В., доктор технічних наук, професор, Чернігівський національний технологічний університет.

Енергетика, електротехніка та електромеханіка

Вінніков Д., доктор технічних наук, професор, Таллінський університет технологій (Естонія);
Волков І. В., доктор технічних наук, професор, Інститут електродинаміки НАН України;
Галкін І., доктор технічних наук, професор, Ризький технічний університет (Латвія);
Гусев О. О., кандидат технічних наук, доцент, Чернігівський національний технологічний університет;
Денисов Ю. О., доктор технічних наук, професор, Чернігівський національний технологічний університет;
Ромеро-Кадавал Е., доктор технічних наук, професор, Університет Естремадури (Іспанія);
Скоробогатова В. І., доктор технічних наук, професор, Чернігівський національний технологічний університет.

Хімічні та харчові технології

Самохвалова О. В., кандидат технічних наук, професор, Харківський державний університет харчування та торгівлі;

Сиза О. І., доктор технічних наук, професор, Чернігівський національний технологічний університет;
Цибуля С. Д., доктор технічних наук, професор, Чернігівський національний технологічний університет.

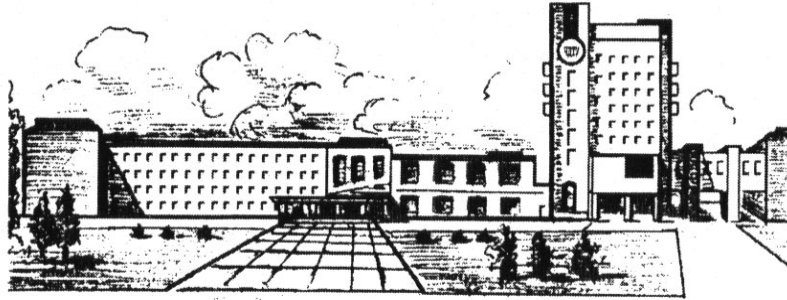
Будівництво та геодезія

Вінніков Ю. Л., доктор технічних наук, професор, Полтавський національний технічний університет;
Шульц Р. В., доктор технічних наук, професор, Київський національний університет будівництва і архітектури.



ISSN 2411-5363 (print)
ISSN 2519-4569 (online)

**MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
CHERNIHIV NATIONAL UNIVERSITY OF TECHNOLOGY**



TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

SCIENTIFIC JOURNAL

ISSUE № 1 (15)

Chernihiv 2019

UDC 62:67.05

DOI: 10.25140/2411-5363-2019-1(15)

Published by the decision of the Academic Council of the Chernihiv National University of Technology (protocol № 3 dated 25.03.2019). Scientific journal “Technical sciences and technologies” is included into the list of scientific specialized editions of Ukraine, approved by the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine dated December 28, 2017 № 1714.

Technical sciences and technologies: scientific journal / Chernihiv National University of Technology. – Chernihiv : Chernihiv National University of Technology, 2019. – № 1 (15). – 290 p.

This issue of the journal “Technical sciences and technologies” contains articles devoted to theoretical and experimental research in the scientific direction "Technical Sciences": mechanical engineering, electrical engineering, information technology, chemical and bioengineering, manufacturing and technology, architecture and construction. The articles are reviewed by leading scientists in relevant fields of knowledge.

Journal “Technical sciences and technologies” will be useful for the scientific and technical workers, postgraduates, master students and students of higher technical educational establishment.

UDC 62:67.05

Editor in chief:

Kazymyr V. V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Chernihiv National University of Technology (ChNUT).

Deputy Editor in chief:

Sapon S. P., PhD in Technical Sciences, Associate Professor; ChNUT.

Members of the Editorial Board:

Applied mechanics, materials science and machine building

Boyko S. V., PhD in Technical Sciences, Associate Professor; ChNUT;

Bolotov H. P., Doctor of Technical Sciences, Professor; ChNUT;

Dubenets V. H., Doctor of Technical Sciences, Professor, ChNUT;

Yeroshenko A. M., PhD in Technical Sciences, Associate Professor; ChNUT.

Kalchenko V. I., Doctor of Technical Sciences, Professor; ChNUT;

Kalchenko V. V., Doctor of Technical Sciences, Professor; ChNUT;

Novomlynets O. O., Doctor of Technical Sciences, Professor; ChNUT;

Pilipenko O. I., Doctor of Technical Sciences, Professor, ChNUT.

Information and computer technologies

Azarov O. D., Doctor of Technical Sciences, Professor, Vinnytsia National Technical University;

Yarchola Michal, Professor, President of the Academic society of Michal Baludansky, Slovakia;

John N. Davies, Professor, Department of Computer Science, Glyndwr University, Wrexham, U.K.;

Zaitsev S. V., Doctor of Technical Sciences, ChNUT;

Lytvynov V. V., Doctor of Technical Sciences, Professor; ChNUT.

Power engineering, electrical engineering and electromechanical engineering

Vinnikov D., Doctor of Science, Senior Researcher, Head of Power Electronics R&D Group, Tallinn University of Technology, Tallinn, Estonia;

Volkov I. V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine;

Galkin I., Doctor of Science, Professor, Riga Technical University, Riga, Latvia;

Husev O. O., PhD in Technical Sciences, Associate Professor; ChNUT;

Denysov Yu. A., Doctor of Technical Sciences, Professor; ChNUT;

Romero-Cadaval E., Doctor of Science, Professor, University of Extremadura, Badajoz, Spain;

Skorobohatova V. I., Doctor of Technical Sciences, Professor; ChNUT.

Chemical and food technologies

Samokhvalova O. V., PhD in Technical Sciences, Professor, Kharkiv State University of Food Technology and Trade;

Syza O. I., Doctor of Technical Sciences, Professor; ChNUT;

Tsybulia S. D., Doctor of Technical Sciences, Professor; ChNUT.

Construction and geodesy

Vynnykov Y. L., Doctor of Technical Sciences, Professor, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University;

Shults R. V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Kyiv national university of construction and architecture.



ЗМІСТ

РОЗДІЛ I. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО
ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

<i>Болотов М., Болотов Г., Прибитько І., Новомлинець О.</i> Оцінка напружено-деформованого стану дифузійно-зварних з'єднань різнорідних матеріалів, отриманих при нагріванні в тліючому розряді.....	9
<i>Дубик Я., Селіверстова І., Богдан А.</i> Застосування понять короткого та довгого рішень теорії оболонки для аналізу НДС трубопроводів з кутовою неспіввісністю.....	21
<i>Герасименко О., Марков О.</i> Розвиток наукових основ комп'ютерного моделювання процесів гарячого деформування.....	31
<i>Кальченко В. І., Кальченко В. В., Кузьельний Я., Морочко В.</i> Визначення сил різання при чистовому шліфуванні циліндричної поверхні вала.....	41
<i>Следнікова О., Винник В., Скляр В., Аксьонова О.</i> Модульне 3D моделювання інструментів, процесу зняття припуску та формоутворення при фрезеруванні кулачків зі схрещеними осями інструмента та деталі.....	53
<i>Сіра Н., Кологойда А., Литвин О., Кальченко Д.</i> Визначення сил різання при чистовому шліфуванні циліндричної та голчастої поверхонь валика текстильної машини.....	63
<i>Михалків С., Фалендиш А., Бульба В., Ходаківський А.</i> Застосування спектрального ексцесу для вібродіагностування тягового редуктора електропоїзда.....	73
<i>Шаповалов О., Колесник Д., Пилипенко О.</i> Коливальні процеси в зубчастих передачах авіаційних редукторів та шляхи підвищення їх вібраційної міцності.....	80
<i>Fedorunenko D., Sapon S.</i> Hydrostatic spindle for ultra-precision two-sided machining.....	97
<i>Майданюк С., Ковальова Л.</i> Комп'ютерне моделювання дискового інструменту для гвинтових канавок свердел.....	106

РОЗДІЛ II. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Андрущенко Р.</i> Порівняльний аналіз показників ефективності методів серіалізації даних у комп'ютерних мережах.....	115
<i>Бунке О.</i> Переваги хмарних технологій при використанні у Internet of Things (IoT).....	127
<i>Loutskii H., Volokyta A., Rehida P., Goncharenko O.</i> Using excess code to design fault-tolerant topologies.....	134
<i>Усов Я.</i> Проблеми захищеності інформаційного середовища.....	145
<i>Дубягін О., Гур'єв В.</i> Система показників міжрівневого балансу: агрегатна форма.....	152

РОЗДІЛ III. ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

<i>Аникін П., Беляк Е.</i> Аналіз ефективності багатоуровневого кодування даних при многослойной фотолюминесцентной записи информации.....	162
<i>Жученко О.</i> Управління динамічними об'єктами з розподіленими параметрами з використанням прогнозуючих моделей.....	172

РОЗДІЛ IV. ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Буяльська Н., Купчик О., Денисова Н.</i> Використання сорбентів для зниження концентрації важких металів у молочній сировині.....	181
<i>Дорохович В., Донець А.</i> Зменшення глікемічності та калорійності пряників шляхом застосування цукрозаїміників мальтитола та ізомальтитола.....	189
<i>Жигунов Д., Ковальова В., Ковальов М., Коритнюк О.</i> Визначення показників якості індивідуальних потоків борошна із заводу зі скороченою схемою технологічного процесу.....	195
<i>Трус І., Гомеля М., Мельниченко Є., Мігранова В.</i> Очищення води від іонів важких металів відстоюванням, нанофільтруванням та флоатацією.....	204
<i>Михайлова Г., Осієвська В., Галько С., Озимок Г.</i> Дослідження якості та безпечності матеріалів наповнювачів та чохлів подушок для сну.....	214

Осика В., Коптюх Л., Комаха В., Шульга О., Мостика К. Паперотвірні властивості целюлози різних видів та ступенів помелу 227

Паламарек К. Використання розроблених овочевих паст із йодовмісною сировиною в технології рулетів з овочевими начинками 235

РОЗДІЛ V. БУДІВНИЦТВО ТА ГЕОДЕЗІЯ

Іванишин В., Чорний Є. Фактори формування хімічного складу підземних вод Чернігівського родовища та організація зон їх санітарної охорони 246

Крячок С. Дослідження критеріїв із виявлення залишкових систематичних похибок у результатах подвійних нерівноточних геодезичних вимірювань 258

Дешко В., Білоус І., Максименко О. Сучасні проблеми системи опалення багатоквартирних житлових будинків 267

Терещук О., Сахно Є., Щербак Ю., Зимовець Д. Проведення тепловізійного моніторингу енергоощадності будівель і споруд 278

ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАЧІ РУКОПИСІВ НАУКОВИХ СТАТЕЙ 289

CONTENT

SECTION I. APPLIED MECHANICS, MATERIALS SCIENCE
AND MACHINE BUILDING

<i>Bolotov M., Bolotov G., Prybytko I., Novomlynets O.</i> Evaluation of a stress and strain state of diffusion-welded joints of different materials received in heating in glow discharge	9
<i>Dubyk Ya., Seliverstova I., Bogdan A.</i> Application of short and long cylindrical shell solutions for stress-strain state analysis in pipes with angular misalignment	21
<i>Gerasimenko O., Markov O.</i> Development of scientific bases of computer simulation of hot deformation processes	31
<i>Kalchenko V., Kalchenko V., Kuzhelnyi Ya., Morochko V.</i> Determination of cutting forces during finishing grinding of the cylindrical surface of the shaft	41
<i>Sliednikova O., Vynnyk V., Sklyar V., Aksonova O.</i> Modular 3D modeling of tools, process of adaptation removal and forming at milling the cams with crossing tools and details	53
<i>Sira N., Kolohoida A., Lytvyn O., Kalchenko D.</i> Definition of force cutting at fair grinding of cylindrical and needle roller surface of a textile machine	63
<i>Mykhalkiv S., Falendysh A., Bulba V., Khodakivskyi A.</i> Application of the spectral kurtosis for the traction gearbox vibrodiagnostics of an electric train	73
<i>Shapovalov O., Kolesnik D., Pilipenko O.</i> Oscillation processes in gearing of aviation reducers and way of increase of their vibrational durability	80
<i>Fedorynenko D., Sapon S.</i> Hydrostatic spindle for ultra-precision two-sided machining	97
<i>Maidaniuk S., Kovalova L.</i> Computer modeling of the disk tool for screw guns drills	106

SECTION II. INFORMATION AND COMPUTER TECHNOLOGIES

<i>Andrushchenko R.</i> Comparative analysis of the performance characteristics of data serialization methods in computer networks	115
<i>Bunke O.</i> Advantages of cloud technologies while using the internet of things (IoT)	127
<i>Loutskii H., Volokyta A., Rehida P., Goncharenko O.</i> Using excess code to design fault-tolerant topologies	134
<i>Usov Ya.</i> Problems of the informational environment protection	145
<i>Dubyagin A., Guryev V.</i> The system of indicators of inter-level balance: aggregate form	152

SECTION III. POWER ENGINEERING, ELECTRICAL ENGINEERING
AND ELECTROMECHANICAL ENGINEERING

<i>Anikin P., Beliak Ie.</i> Analysis of the effectiveness of multi-level data coding for multilayer photoluminescent information recording	162
<i>Zhuchenko O.</i> Control of dynamic objects with distributed parameters using predictive models	172

SECTION IV. CHEMICAL AND FOOD TECHNOLOGIES

<i>Buialska N., Elena K., Denisova N.</i> Use of sorbents for reducing the concentration of heavy metals in milk raw material	181
<i>Dorohovich V., Donets A.</i> Reduction of glycemicity and calorium of gingerbread by application of sugar substitutes maltitol and isomaltitol	189
<i>Zhygunov D., Kovalova V., Kovalov M., Korytnyuk O.</i> Indicators determination of individual flows quality streams from the plant with the reduced scheme of the technological process	195
<i>Trus I., Gomelya N., Melnychenko Ye., Mihranova V.</i> Water purification from heavy metal ions using sedimentation, nanofiltration and flotation	204
<i>Mykhailova G., Osievska V., Galko S., Ozymok G.</i> Quality and safety research of pillows fillers and covers materials for sleep	214
<i>Osyka V., Koptuyh L., Komakha V., Shulga O., Mostyka K.</i> Paper-forming properties of cellulose of different types and degrees of grinder	227

<i>Palamarek K.</i> The use of developed vegetable pastes with iodine-containing raw materials in the technology of rolls with vegetable stuffing	235
---	-----

SECTION V. CONSTRUCTION AND GEODESY

<i>Ivanyshyn V., Chornyi E.</i> Factors of the formation of the chemical composition of underground waters of the Chernihiv deposit and organization of zones of sanitary protection of their	246
---	-----

<i>Kryachok S.</i> Researches of criteria for determination of residual systematic errors in the results of double geodetic measurements unequal accuracy.....	258
--	-----

<i>Deshko V., Bilous I., Maksymenko O.</i> Modern problems of the heating system of multi-apartment buildings	267
---	-----

<i>Tereshchuk O., Sakhno Ye., Shcherbak Yu., Zymovets D.</i> Conducting thermal important monitoring of buildings and constructions energy saving.....	278
--	-----

BASIC REQUIREMENTS FOR EXECUTION AND SUBMISSION OF MANUSCRIPTS OF SCIENTIFIC ARTICLES	289
--	------------

РОЗДІЛ І. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.791.12

DOI: 10.25140/2411-5363-2019-1(15)-9-20

Максим Болотов, Геннадій Болотов, Ірина Прибисько, Олег Новомлинець

ОЦІНКА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ДИФУЗІЙНО-ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ РІЗНОРІДНИХ МАТЕРІАЛІВ, ОТРИМАНИХ ПРИ НАГРІВАННІ В ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ

Актуальність теми дослідження. На сьогодні тліючий розряд середніх тисків знайшов значне поширення в різних технологічних процесах хіміко-термічної обробки, нанесення покриттів, зварювання і паяння завдяки можливості регулювання теплових впливів у широких межах.

Постановка проблеми. Однак поряд зі сприятливими передумовами виявили і недоліки, здебільшого пов'язані зі складнощами зварювання в полі нормального тліючого розряду деталей, що суттєво відрізняються за теплофізичними властивостями, що зумовлено особливостями теплового впливу при підвищених тисках газу в робочій камері.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Показано, що тліючий розряд, який горить у порожнистому катоді, забезпечує рівномірний розподіл теплової енергії, що забезпечує можливість отримання надійних метало-керамічних дифузійно-зварних з'єднань.

Мета роботи. Метою цієї роботи є порівняльний аналіз напружено-деформованого стану (НДС) при дифузійному зварюванні з'єднань із різнорідних матеріалів, що виникає під час нагрівання в нормальному тліючому розряді та тліючому розряді, ініційованому в порожнистому катоді.

Виклад основного матеріалу. Шляхом комп'ютерного моделювання в програмному пакеті ANSYS v.16.0 здійснено порівняльний аналіз напружено-деформованого стану дифузійно-зварних теплофізично «тонких» та «масивних» деталей у процесі нагрівання в полі нормального тліючого розряду та розряду в порожнистому катоді.

Висновки відповідно до статті. Встановлено, що при нагріванні теплофізично «масивних» різнорідних тіл у плазмі НТР утворюється несприятливий НДС із рівнем напружень, що на 19% перевищує межу витривалості кераміки. Такий вузол функціонувати не може. Водночас під час зварювання в ТРПК рівень напружень, що виникають у «масивних» з'єднаннях не перевищує допустимий.

Ключові слова: тліючий розряд; напружено-деформований стан; газорозрядна плазма; дифузійне зварювання.

Рис.: 13. Бібл.: 13.

Актуальність теми дослідження. У сучасній техніці дедалі більшого поширення набувають вироби з нових спеціальних біметалевих, металокерамічних, склометалічних композиційних матеріалів, що забезпечують роботу конструкції в надскладних експлуатаційних умовах (висока температура, тиск, агресивність середовища, абразивний знос тощо). Створення виробів із таких матеріалів стає більш масовим, але наявні методи й обладнання для їх виготовлення не завжди дозволяють забезпечити достатній рівень їхньої якості та надійності.

На сьогодні для отримання таких вузлів значного поширення набули методи зварювання тиском із підігрівом, найбільш технологічним серед яких виявилось саме дифузійне зварювання. Велике різноманіття форм виробів і сполучення матеріалів, що з'єднуються, зумовило застосування різних джерел нагрівання для дифузійного зварювання (радіаційне, індукційне, електроконтактне, газорозрядне в плазмі тліючого розряду).

У роботах [1; 2] показано, що застосування іонного нагрівання плазмою нормального тліючого розряду дозволяє розширити технологічні властивості дифузійного зварювання різнорідних матеріалів, що дає змогу розробляти принципово нові конструкційні матеріали.

Досвід застосування тліючого розряду середніх тисків у промислових умовах показав, що завдяки технологічним можливостям і високій економічній ефективності він є дуже ефективним джерелом нагрівання під час дифузійного зварювання виробів малих і середніх габаритів [3; 4; 5] з однорідних і різнорідних матеріалів.

Постановка проблеми. В умовах зварювального нагрівання тліючий розряд проявляє себе як джерело з нормальним розподілом теплового потоку в катодній плямі розряду [6] із максимумом концентрації в точках, найбільш наближених до анода (рис. 1).

Однак підвищення тиску газу в робочій камері призводить до збільшення густини розрядного струму i , відповідно, інтенсивності зварювального нагрівання. Джерело нагрівання при цьому з нормально-смугового стає зосередженим кільцевим. У таких умовах концентрованої дії теплового потоку виникають певні складнощі в процесі зварювання вузлів із матеріалів, що суттєво відрізняються за теплофізичними властивостями. Нагрівання таких вузлів зосередженим джерелом теплоти, унаслідок різниці теплопровідності металевих та неметалевих матеріалів, неминуче призведе до появи градієнта температур на їхніх поверхнях. При зварюванні металів із неметалами це є в жодному разі неприпустимо. Оскільки за умови відсутності пластичних властивостей у кераміки, така нерівномірність нагрівання стає причиною появи значних залишкових об'ємних напружень, здатних призвести до їхнього руйнування.

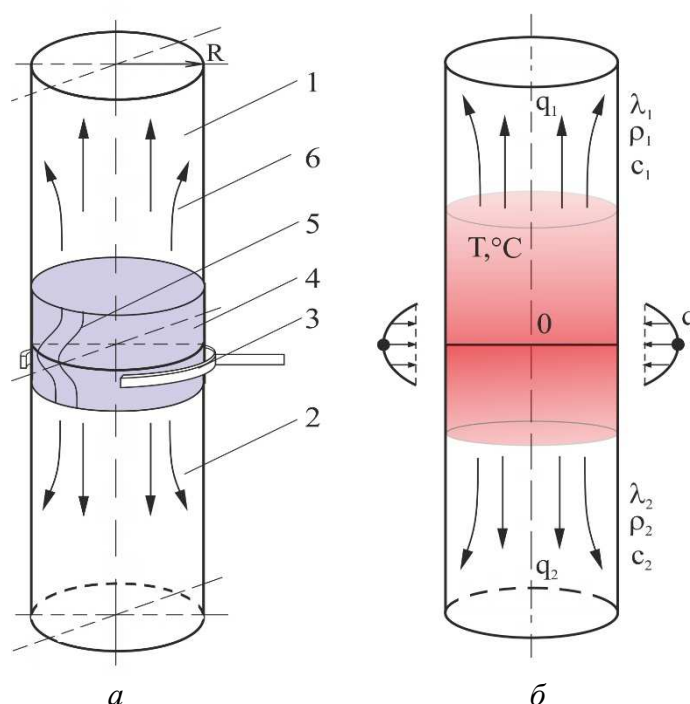


Рис. 1. Схема нагрівання (а) та характер розподілу температури в зоні контакту (б) при нагріванні в плазмі нормального тліючого розряду:

- 1, 2 – деталі, що зварюються; 3 – контурний анод; 4 – зона нагрівання (катодна пляма);
5 – розподіл густини струму; б – розповсюдження тепла; q – потужність розряду;
 c_p – об'ємна теплоємність матеріалу; λ – теплопровідність матеріалу

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Водночас у роботах [7; 8], що тліючий розряд ініційований у порожнистому катоді в умовах зварювального нагрівання забезпечує рівномірний розподіл теплової енергії по поверхнях деталей, що зварюються. Оскільки при нагріванні в тліючому розряді з порожнистим катодом зразки, що зварюються, є електронейтральними і розміщуються в іонізованій плазмі області негативного тліючого світіння (рис. 2), що локалізується всередині катодної порожнини, то вся їхня бічна поверхня буде піддаватися інтенсивному бомбардуванню потоками швидких електронів, емітованих із поверхні катоду внаслідок іонно-електронної емісії й розігнаних в області катодного падіння потенціалів. Наведені в роботі [9] результати досліджень локальних властивостей плазми тліючого розряду з порожнистим катодом в умовах зварювання показують, що характер розподілу густини електронного струму по поверхнях зварних деталей близький до рівномірного з осьовим відхиленням не більше ніж

на 20 %, що дає підставу вважати тліючий розряд, що горить у порожнистому катоді, рівномірно розподіленим джерелом теплоти.

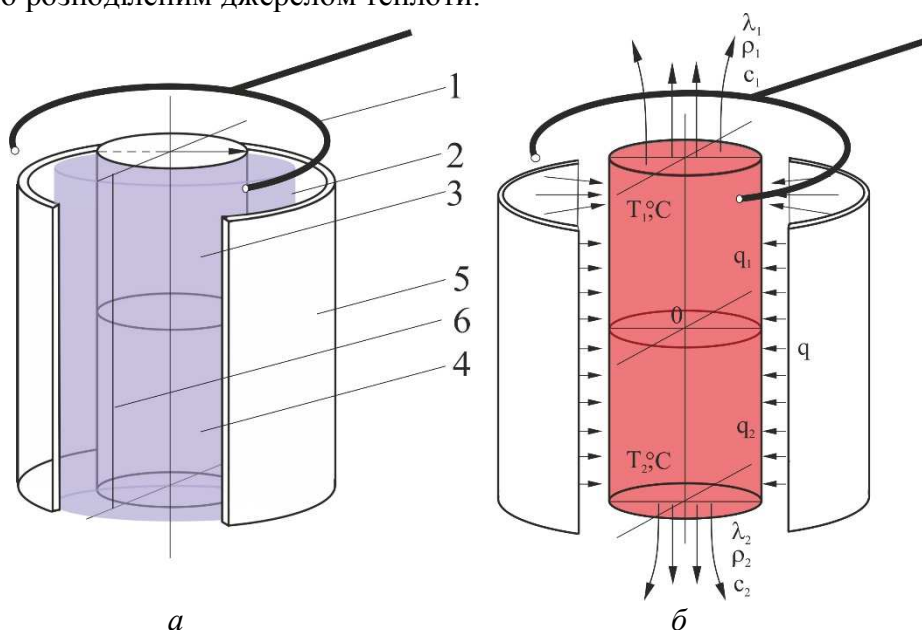


Рис. 2. Схема нагрівання (а) та характер розподілу температури в зоні контакту (б) при нагріванні в плазмі тліючого розряду ініційованого в порожнистому катоді:
 1 – анодне кільце; 2 – від'ємне тліюче світіння; 3,4 – деталі, що зварюються; 5 – порожнистий катод;
 б – розподіл густини струму по поверхнях зварюваних деталей; q – потужність розряду;
 c_p – об'ємна теплосмність матеріалу; λ – теплопровідність матеріалу

Мета роботи. Метою даної роботи є порівняльний аналіз напружено-деформованого стану (НДС) при дифузійному зварюванні з'єднань із різнорідних матеріалів, що виникає при нагріванні в нормальному тліючому розряді і тліючому розряді, ініційованому в порожнистому катоді. Для аналізу використовувалося комп'ютерне моделювання на базі методу скінчених елементів із застосуванням програмного пакета ANSYS v.16.0.

Виклад основного матеріалу. Дослідження здійснювали для металокерамічних (ВСт3сп+ЦТС-19) вузлів із неузгодженими теплофізичними властивостями. Так, величина ТКЛР для досліджуваних пар зразків може бути прийнятою такою, що відрізняється на $13 \cdot 10^6$ град⁻¹.

Моделювали НДС, що виникає в дифузійно-зварних неузгоджених з'єднаннях в процесі їх охолодження на 200 °С від температури зварювання (900 °С). Як моделі були обрані вузли циліндричної форми діаметром 10 мм, висотою 15 мм та діаметром 30 мм, висотою 30 мм. У першому випадку виріб можна віднести до теплофізично «тонких» тіл, для яких величина критерія Біо повинна відповідати такій умові: $Bi < 0,1 \dots 0,12$ [10] (у нашому випадку $Bi \approx 0,09$). У другому випадку виріб відноситься до теплофізично «масивних» тіл, оскільки величина критерію Біо становила вже $Bi \approx 0,2$, що є вище зазначеного діапазону. Загальний вигляд досліджуваних моделей представлено на рис. 3.

Моделювання нагрівання в плазмі нормального тліючого розряду здійснювали за умови застосування кільцевого контурного аноду діаметром 20 та 40 мм завтовшки 5 мм. Нагрівання в ТРПК забезпечували катодом діаметром 40 та 60 мм заввишки 40 мм. Таким чином, відстань від бічної поверхні виробу до стінки катода (анода для НТР) зберігалася на постійному рівні і становила для нормального ТР 5 мм, для ТРПК – 15 мм. Зміну траєкторії руху іонів та електронів під дією електричного поля в моделі не враховували. Отже, вважали, що нагрівання здійснюється спрямованим по нормалі до поверхні виробу джерелом теплоти.

Для зменшення напружень, що виникають при дифузійному зварюванні різномірних матеріалів із різним ТКЛР, застосовували проміжні прошарки із безолов'яної бронзи Брб-1 завтовшки 0,2 та 1 мм, що мають високий рівень пластичності та виконують функцію своєрідних демпферів, тим самим гасячи виникаючі термонапруження.

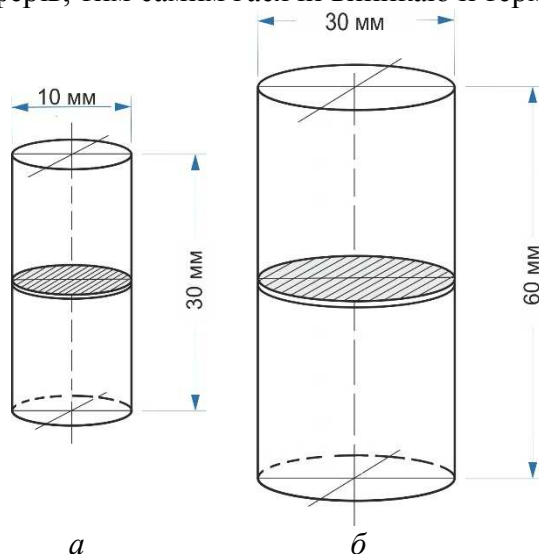


Рис. 3. Моделі досліджуваних типів з'єднань теплофізично «тонких» тіл (а) та теплофізично «масивних» тіл (б)

У модель заносилися параметри режимів зварювання, встановлені експериментальним шляхом і детально описані в [11]. Швидкість охолодження вузлів приймали рівною $V_{ох} = 5$ К/хв. Як було вищезазначено, складність отримання дифузійно-зварних з'єднань із неузгоджених матеріалів, до яких відносяться металокерамічні з'єднання, полягає в різкій відмінності їхніх теплофізичних властивостей. Значна різниця ТКЛР більшості металів і кераміки при майже повній відсутності пластичних властивостей в останній робить цей вузол дуже чутливим до перепаду температур як у процесі нагрівання під зварювання, так і в процесі охолодження.

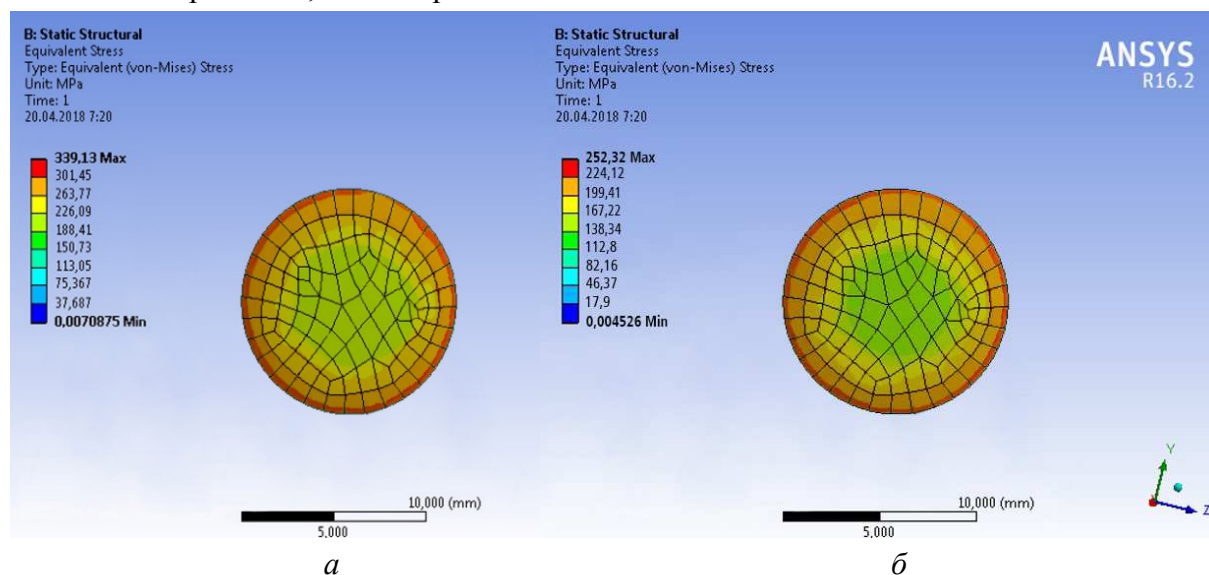


Рис. 4. Поле еквівалентних напружень на стику вузла ВСтЗсп+ЦТС-19 діаметром 10 мм при нагріванні в полі нормального тліючого розряду (а) та в тліючому розряді з ефектом порожнистого катода (б)

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Змодельовано НДС таких з'єднань за умови їх нагрівання в плазмі нормального тліючого розряду і розряду, що горить у порожнистому катоді та наступному охолодженні. Отримані в процесі моделювання поля напружень (рис. 4) та епюри еквівалентних напружень (рис. 5) неузгоджених теплофізично «тонких» тіл при зварюванні в НТР і в ТРПК свідчать, що металокерамічні зварні з'єднання характеризуються складним об'ємним напружено-деформованим станом із помітною неоднорідністю розподілу полів напружень у зоні стику.

Максимальні значення еквівалентних напружень у зоні стику знаходяться в межах норми і становлять 339 МПа для НТР та 252 МПа для ТРПК і локалізуються по краях заготовки. Із наближенням до центра їх значення поступово зменшуються до мінімальних 188...138 МПа для НТР та ТРПК відповідно.

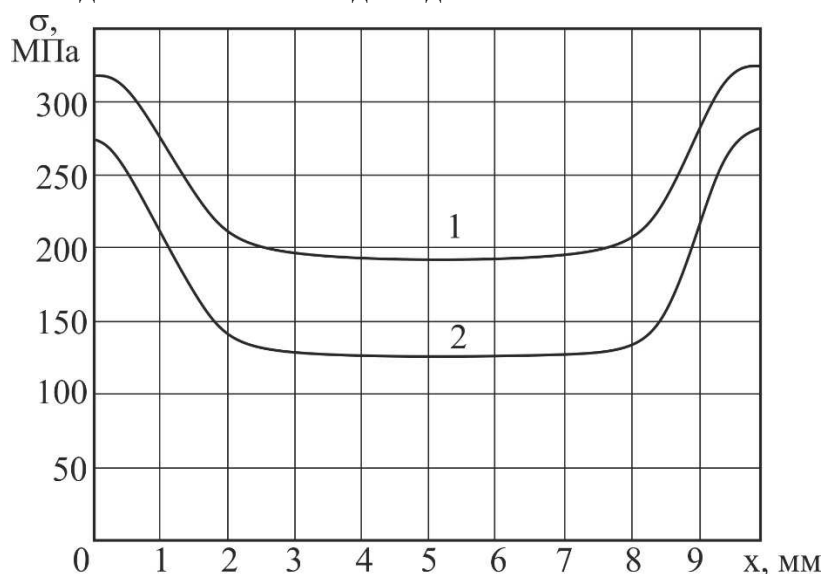


Рис. 5. Епюри еквівалентних напружень по стику вузла ВСтЗсп+ЦТС-19 діаметром 10 мм виконаних у нормальному тліючому розряді (1) та в тліючому розряді із порожнистим катодом (2)

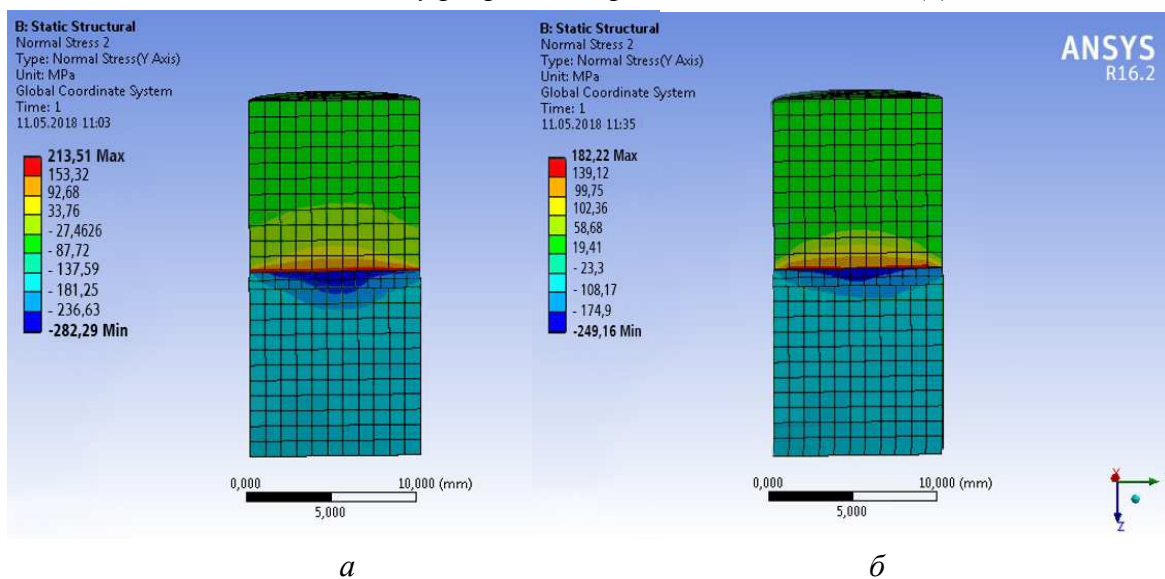


Рис. 6. Поля осьових напружень, що виникають у теплофізично «тонких» неузгоджених зварних з'єднаннях, отриманих у плазмі НТР (а) та ТРПК (б)

Аналіз осьових напружень, що виникають при охолодженні металокерамічного з'єднання до 700 °С, тобто на 200 °С від температури зварювання, поля яких наведені

на рис. 6, показує, що їх розподіл у матеріалах носить майже рівномірний характер зі збільшенням до максимуму їхніх значень біля зварного стику. Це кількісно ілюструє епюра осьових термонапружень, що наведена на рис. 7. Такий розподіл осьових напружень є найбільш оптимальним із погляду деформаційної активації процесу масопереносу, оскільки в цій області рівень пластичних деформацій буде найбільшим.

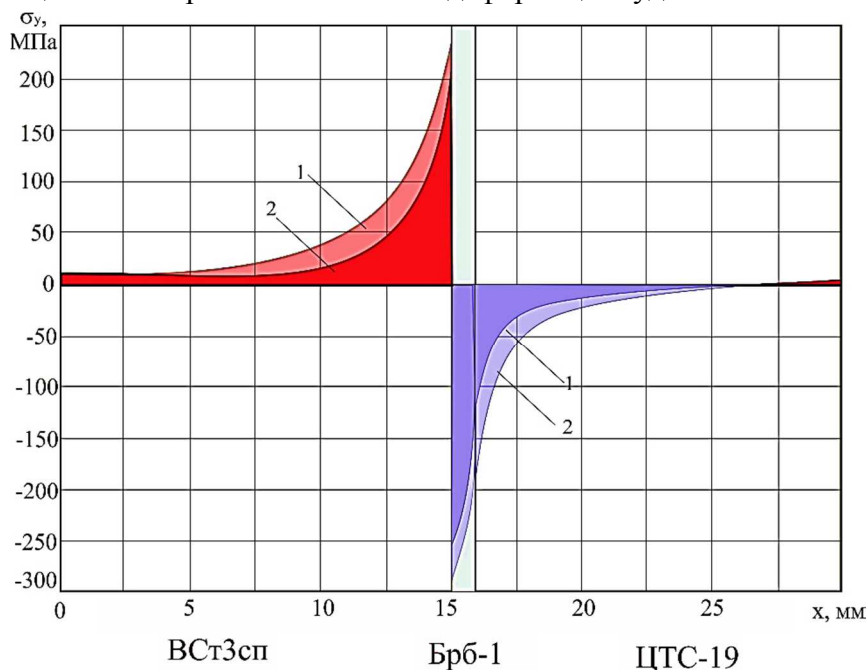


Рис. 7. Епюри осьових напружень, що виникають при зварюванні теплофізично «тонких» неузгоджених з'єднань у плазмі НТР (1) та ТРПК (2)

Отримані епюри осьових напружень у металокерамічному з'єднанні показують, що основним місцем локалізації осьових термонапружень є зварний стик (металевий прошарок), максимальні значення яких знаходяться на рівні -249...-282 МПа для ТРПК та НТР відповідно. Ці напруження не є критичними (руйнівними), оскільки тимчасовий опір на розтяг (стиск) матеріалу прошарку (Брб-1) становить 600 МПа. Знак мінус вказує на характер напружень, у цьому випадку це стиск, що не є характерним для металевих матеріалів, оскільки при охолодженні в них виникають, переважно напруження розтягу. Такий ефект може бути наслідком впливу на матеріал прошарку більш жорсткого матеріалу з яким вона контактує – керамікою. Авторами [12] встановлено, що при охолодженні дифузійно-зварного з'єднання з матеріалів різної жорсткості в менш жорсткому матеріалі біля стику буде формуватися напружений стан близький до всебічного стиску. Це припущення є справедливим, оскільки при охолодженні більш жорсткий матеріал (у нашому випадку п'єзокераміка), піддаючись впливу саме стискаючих напружень, буде намагатись стиснути матеріал із меншою жорсткістю (у нашому випадку бронза). Максимальні значення осьових напружень, що виникають при цьому, у п'єзокераміці знаходяться в межах -181 МПа для НТР та -108 МПа для ТРПК. Однак навіть такі значення осьових напружень не становить небезпеки для працездатності металокерамічного «тонкого» вузла, оскільки межа витривалості п'єзокераміки на стиск – 294 МПа.

Метал піддається дії розтягуючих напружень, максимальні значення яких також сконцентровані в області стику з розкриттям біля бічної поверхні виробу. Значення таких напружень не перевищують 213 МПа для НТР та 182 МПа для ТРПК.

Необхідно зазначити, що загальний рівень напружень, що виникає в теплофізично «тонкому» металокерамічному з'єднанні при зварюванні в ТРПК, у середньому на 20...25 % нижче, ніж у НТР. Більш складна картина НДС виникає в теплофізично «ма-

сивних» неузгоджених зварних з'єднаннях, отриманих дифузійним зварюванням у плазмі НТР та ТРПК. Поля еквівалентних напружень, що виникають у зоні зварного стику, наведено на рис. 8.

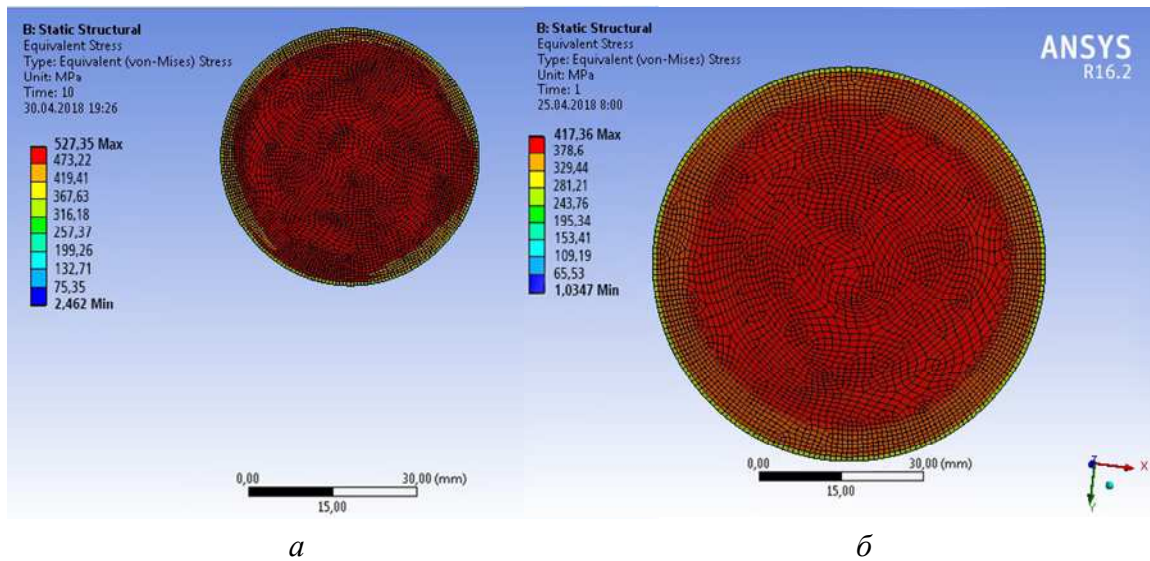


Рис. 8. Поле еквівалентних напружень в стику вузла ВСтЗсп+ЦТС-19 діаметром 30 мм при нагріванні в полі нормального тліючого розряді (а) та в тліючому розряді з ефектом порожнистого катода (б)

Отримані в процесі моделювання поля та епюри еквівалентних напружень, наведені на (рис. 9), показують, що в межах стику максимальні напруження розподілені майже рівномірно із деяким зниженням по краях заготовки. Максимальні значення еквівалентних напружень у стику знаходяться в межах допустимих і становлять 527 для НТР та 417 для ТРПК, що в середньому на 36...40 % перевищують ті ж самі, отримані при зварюванні теплофізично «тонких» тіл. Поля розподілу осьових напружень (рис. 10) та епюри осьових напружень (рис. 11), що виникають у «масивному» тілі, показують, що основним концентратором напружень є зварний стик із максимумом напружень на рівні -562 МПа для НТР та -418 МПа для ТРПК. Для матеріалу прошарку ці напруження не становлять небезпеки, але є небезпечними для п'єзокераміки.

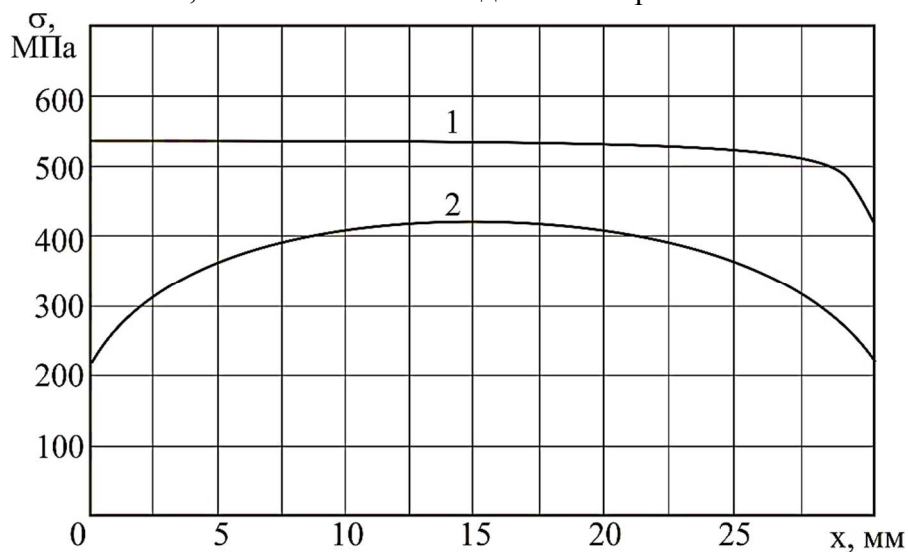


Рис. 9. Епюри еквівалентних напружень по стику вузла ВСтЗсп+ЦТС-19 діаметром 30 мм виконаних у нормальному тліючому розряді (1) та в тліючому розряді з порожнистим катодом (2)

Так, при зварюванні «масивних» металокерамічних з'єднань осьові напруження, що виникають у ЦТС, знаходяться на рівні -361 МПа для НТР, що на 19 % перевищує межу тимчасового опору матеріалу на стиск (-294 МПа) і ймовірно стануть для вузла руйнівними, та -278 МПа для ТРПК, що не перевищує порогового значення. У металевому матеріалі осьові напруження знаходяться в межах допустимих і становлять 276...329 для ТРПК та НТР відповідно.

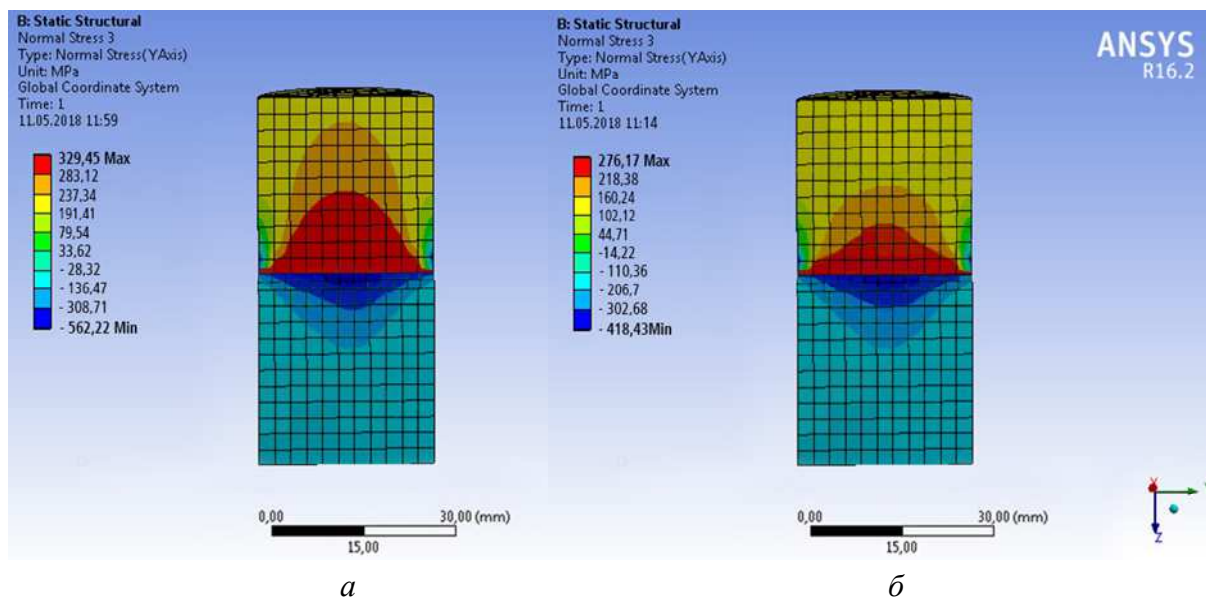


Рис. 10. Поля осьових напружень, що виникають у теплофізично «масивних» неузгоджених зварних з'єднаннях, отриманих у плазмі НТР (а) та ТРПК (б)

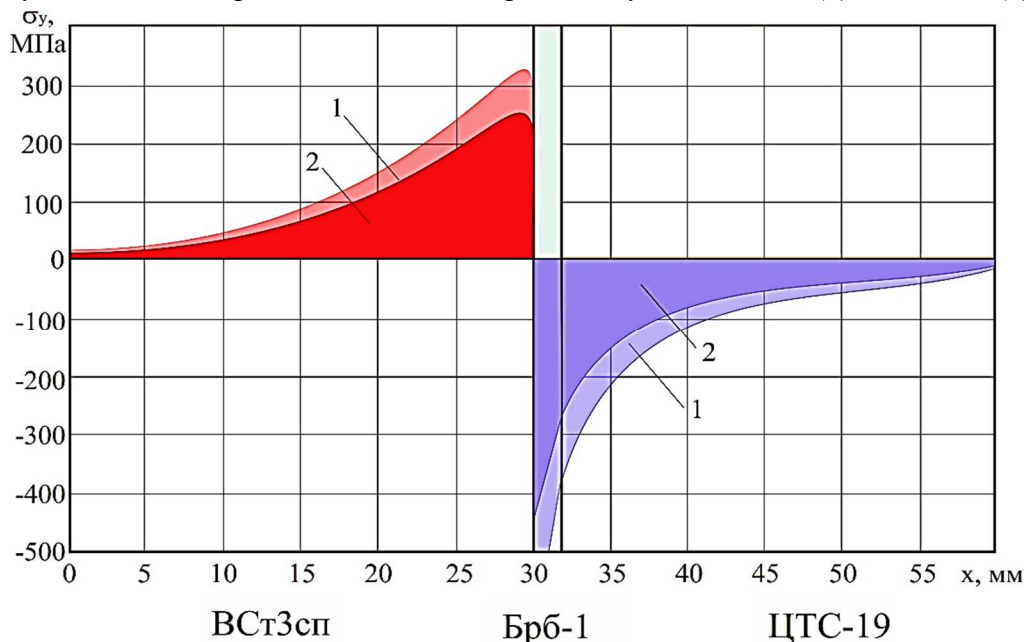


Рис. 11. Епюри осьових напружень, що виникають при зварюванні теплофізично «масивних» неузгоджених з'єднань у плазмі НТР (1) та ТРПК (2)

Для більш повного розуміння картини напружено-деформованого стану, що виникає в області сполучення різнорідних матеріалів, були досліджені й дотичні (зсуваючі) напруження, оскільки вони відіграють чи не найголовнішу роль у процесах деформаційної активації більш твердої поверхні [13]. Поля цих напружень для НТР та ТРПК наведено на рис. 12.

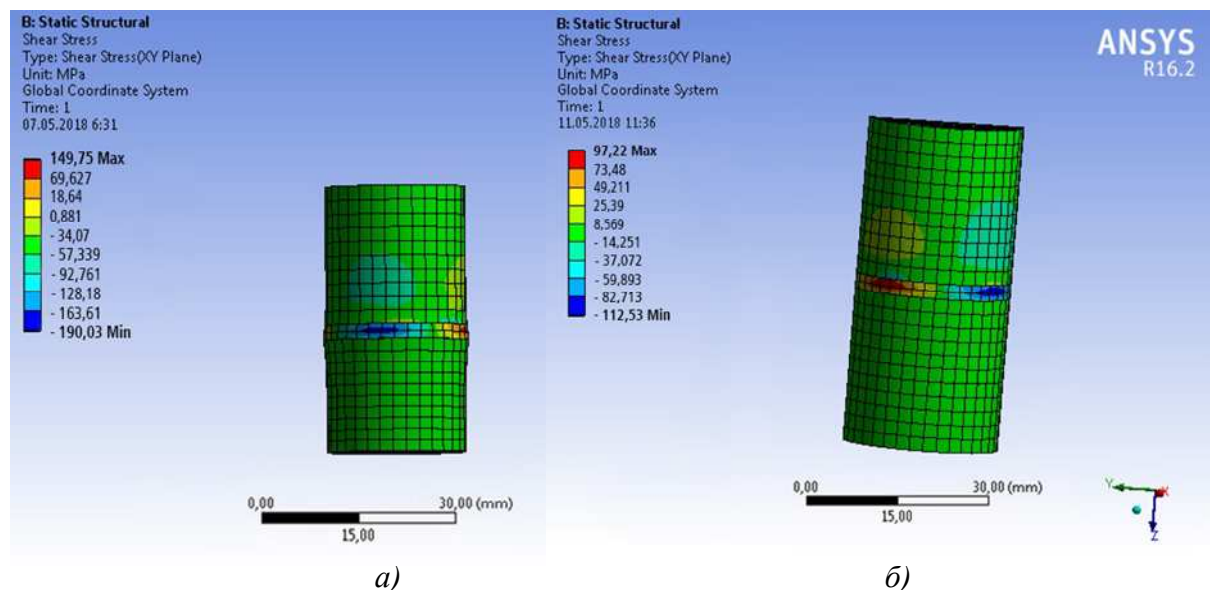


Рис. 12. Поля дотичних напружень, що виникають у теплофізично «масивних» неузгоджених зварних з'єднаннях, отриманих у плазмі НТР (а) та ТРПК (б)

Епюри дотичних напружень, наведені на рис. 13, показують, що їх максимум концентрується біля поверхні більш жорсткого матеріалу (кераміки) зі значеннями на рівні -190 МПа для НТР та -112 МПа для ТРПК. Треба зазначити, що рівень дотичних напружень суттєво нижче за еквівалентні й осьові та не виходять за межі допустимих як для НТР, так і ТРПК.

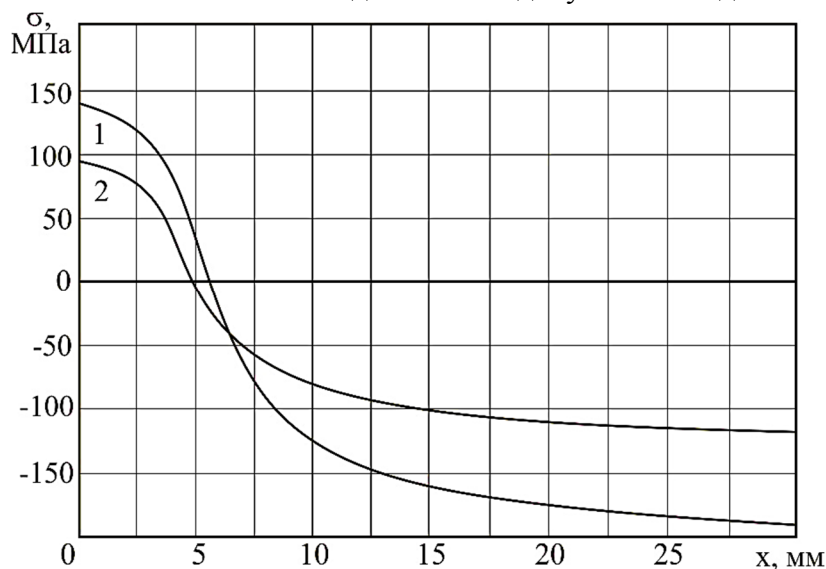


Рис. 13. Епюри дотичних напружень, що виникають при зварюванні теплофізично «масивних» неузгоджених з'єднань у плазмі НТР (1) та ТРПК (2)

Висновки відповідно до статті. Таким чином, результати моделювання показують, що зварні з'єднання з неузгоджених матеріалів, виконані дифузійним зварюванням із використанням як джерела нагрівання розподіленої газорозрядної плазми тліючого розряду характеризуються складним об'ємним напружено-деформованим станом із помітною неоднорідністю розподілу полів напружень по перерізу вузла.

Шляхом моделювання в програмному пакеті ANSYS v.16.0, заснованому на методі скінчених елементів, встановлено, що під час дифузійного зварювання в НТР та ТРПК теплофізично «тонких» тіл із неузгодженими властивостями обидва джерела нагрівання забезпечують практично однаковий напружено-деформований стан із локалізацією на-

пружень у зоні зварного стику на рівні допустимих. Такий НДС є оптимальним з погляду деформаційної теорії утворення зварних з'єднань.

Встановлено, що при нагріванні теплофізично «масивних» різнорідних тіл у плазмі НТР утворюється несприятливий НДС із рівнем напружень, що на 19 % перевищує межу витривалості кераміки. Такий вузол функціонувати не може. Водночас у процесі зварювання в ТРПК рівень напружень, що виникають у «масивних» з'єднаннях, не перевищує допустимий.

Список використаних джерел

1. Котельников Д. И. Нагрев тлеющим разрядом при диффузионной сварке. *Вестник Киев. политехн. ин-та. Сер. «Машиностроение»*. 1968. № 5. С. 56–60.
2. Котельников Д. И. Технологические особенности применения тлеющего разряда при сварке. *Технология и организация производства*. 1976. № 7. С. 57–59.
3. Bolotov, G. P., Bolotov, M. G., Rudenko, M. M. Modification of Materials Surface Layers by Low-Energy Ion Irradiation in Glow Discharge. *IEEE 36th International Conference "Electronics and Nanotechnology ELNANO'2016"*. April 2016. P.135–140.
4. Болотов Г. П. Тлеющий разряд как источник нагрева в процессах сварки и пайки (обзор). *Автоматическая сварка*. 2001. № 8. С. 41–44.
5. Болотов Г. П. Установка для диффузионной сварки в тлеющем разряде. *Информ. листок*. Чернигов: МТЦНТИ, 1992. № 2–92. 4 с.
6. Котельников Д. И., Крысанов Ю. Н. Распределение плотности тока в катодном пятне тлеющего разряда. *Автоматическая сварка*. 1979. № 11. С. 27–29.
7. Болотов М. Г., Ганеєв Т. Р. Ефективність нагріву при зварюванні в тліючому розряді з порожнистим катодом. *Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки»*. 2012. № 1 (55). Ст. 126–131.
8. Болотов М. Г., Болотов Г. П. Порівняльна оцінка ефективності джерел енергії для дифузійного зварювання у вакуумі. *Вісник ЧДТУ*. 2010. № 42. С. 144–147.
9. Болотов М. Г. Дослідження локальних властивостей плазми тліючого розряду з порожнистим катодом стосовно до умов зварювального нагріву. *Вісник ЧНТУ. Серія «Технічні науки»*. 2013. № 1. С. 112–119.
10. Рыкалин Н. Н. Расчет тепловых процессов при сварке. Москва: Машгиз, 1951. 296 с.
11. Квасницкий В. В., Ермолаев Г. В., Матвиенко М. В. Напряженно-деформированное состояние при диффузионной сварке узла втулка-втулка из разнородных материалов. *Зб. наук. праць НУК*. 2007. № 2. С. 50–56.
12. Квасницкий В. В., Матвиенко М. В., Лабарткава Ал. В., Пивоварова Т. А. Напряженно-деформированное состояние при диффузионной сварке металлов с различными физико-механическими свойствами применительно к деталям цилиндрической формы. *Зб. наук. праць НУК*. 2007. № 3. С. 61–67.
13. Махненко В. И., Квасницкий В. В., Ермолаев Г. В., Матвиенко М. В. Влияние пластических деформаций на напряженно-деформированное состояние при диффузионной сварке узлов втулка-фланец. *Зб. наук. праць НУК*. 2008. № 2. С. 55–61.

References

1. Kotelnikov, D. I. (1968). Nagrev tleyuschim razryadom pri diffuzionnoy svarke [The Heating by the Glow Discharge While Welding]. *Vestnik Kiev. politehn. in-ta. Ser. «Mashinostroenie» – Bulletin Kiev. Polytechnic Inst. Ser. «Engineering»*, 5, 56–60 [in Ukrainian].
2. Kotelnikov, D. I. (1976). Tehnologicheskie osobennosti primeneniya tleyuschego razryada pri svarke [The Technological Features of Glow Discharge Application in Welding]. *Tehnologiya i organizatsiia proizvodstva – Technology and organization of production*, 7, 57–59 [in Ukrainian].
3. Bolotov, G. P., Bolotov, M. G., Rudenko, M. M. (April 2016). Modification of Materials Surface Layers by Low-Energy Ion Irradiation in Glow Discharge. *IEEE 36th International Conference "Electronics and Nanotechnology ELNANO'2016"* (pp. 135–140) [in English].
4. Bolotov, G. P. (2001). Tleiuschii razriad kak istochnik nagreva v protsessah svarki i paiki (obzor) [The Glow Discharge as a heating source in the Processes of Welding and Brazing]. *Avtomaticheskaya svarka – Automatic welding*, 8, 41–44 [in Russian].

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

5. Bolotov, G. P. (1992). Ustanovka dlia diffuzionnoi svarki v tleiuschem razriade [The Installation for Diffusion Welding in the Glow Discharge]. *Inform. listok – Information sheet*. Chernigov: MTTsNTI, 2–92 [in Russian].
6. Kotelnikov, D. I., Krysanov, Yu. N. (1979). Raspredelenie plotnosti toka v katodnom pyatne tleiuschego razryada [The Distribution of Current Density in the Cathode Spot of Glow Discharge]. *Avtomaticheskaiia svarka – Automatic welding*, 11, 27–29 [in Russian].
7. Bolotov, M. G., Ganieiev, T. R. (2012). EfektivnIst nagrivu pri zvaryuvanni v tIlyuchomu rozryadi z porozhnistim katodom. [The Heating Efficiency of Welding in the Hollow Cathode Glow Discharge]. *Visnik Chernigivskoho derzhavnogo tehnolohichnogo universitetu. Seriya «Tekhnichni nauky» – Visnyk of Chernihiv State Technological University. Series «Technical sciences»*, 1 (55), 126–131 [in Ukrainian].
8. Bolotov, M. G., Bolotov, G. P. (2010). Porivnialna otsinka efektyvnosti dzherel energii dlia difuziynoho zvaryuvannia u vakuumi [The Comparative Estimation of the Energy Sources Efficiency for the Diffusion Welding in Vacuum]. *Visnik Chernigivskoho derzhavnogo tehnolohichnogo universitetu. Seriya «Tekhnichni nauky» – Visnyk of Chernihiv State Technological University. Series «Technical sciences»*, 42, 144–147 [in Ukrainian].
9. Bolotov, M. G. (2013). Doslidzhennya lokalnih vlastivostey plazmi tIlyuchogo rozryadu z porozhnistim katodom stosovno do umov zvaryuvalnogo nagrIvu [The Investigation of Local Properties of Hollow Cathode Glow Discharge Plasma in the Welding Heating Conditions]. *Visnik Chernigivskoho derzhavnogo tehnolohichnogo universitetu. Seriya «Tekhnichni nauky» – Visnyk of Chernihiv State Technological University. Series «Technical sciences»*, 1, 112–119 [in Ukrainian].
10. Rykalin, N. N. (1951). Raschet teplovyih protsessov pri svarke [The Calculation of the Thermal Processes in Welding]. Moscow: Mashgiz [in Russian].
11. Kvasnitskii, V. V., Ermolaev, G. V., Matvienko, M. V. (2007). Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie pri diffuzionnoy svarke uzla vtulka-vtulka iz raznorodnyih materialov [Stress-Strain State in Diffusion Welding of Sleeve-Sleeve knot from the Different Materials]. *Zb. nauk. prats NUK – Collection of scientific works of NUS*, 2, 50–56 [in Russian].
12. Kvasnitskii, V. V., Matvienko, M. V., Labartkava, Al. V., Pivovarova, T. A. (2007). Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie pri diffuzionn svarke metallov s razlichnyimi fizikomechanicheskimi svoystvami primenitelno k detalyam tsilindricheskoy formy [Stress-strain State in Diffusion Welding of Metals with Different Physicomechanical Properties with Reference to Cylindrical parts]. *Zb. nauk. prats NUK – Collection of scientific works of NUS*, 3, 61–67 [in Russian].
13. Mahnenko, V. I., Kvasnitskii, V.V., Ermolaev, G. V., Matvienko, M. V. (2008). Vliyanie plasticheskikh deformatsiy na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie pri diffuzionnoy svarke uzlov vtulka-flanets [The effect of plastic deformation on the stress-strain state in the diffusion welding of nodes sleeve-flange]. *Zb. nauk. prats NUK – Collection of scientific works of NUS*, 2, 55–61 [in Russian].

UDC 621.791.12

Maksym Bolotov, Gennady Bolotov, Iryna Prybytko, Oleh Novomlynets

EVALUATION OF A STRESS AND STRAIN STATE OF DIFFUSION-WELDED JOINTS OF DIFFERENT MATERIALS RECEIVED IN HEATING IN GLOW DISCHARGE

Urgency of the research. Currently the high-current medium pressure glow discharge has been widely used in various technological processes of chemical-thermal treatment, coating, welding and soldering due to the possibility of regulating thermal influences in wide limits.

Target setting. However, along with favorable prerequisites, deficiencies were also found, mainly due to the complexity of welding in the field of normal glow discharge of details that differ significantly in thermophysical properties due to the peculiarities of thermal influence at high gas pressures in the working chamber.

Actual scientific researches and issues analysis. It is shown that the hollow cathode glow discharge provides an even distribution of thermal energy, which ensures the possibility of obtaining reliable metal-ceramic diffusion-welded joints.

The research objective. The purpose of this work is a comparative analysis of stress-strain state in the diffusion welding of compounds from heterogeneous materials, which occurs when heated in a normal glow discharge and glow discharge, initiated in a hollow cathode.

The statement of basic materials. Computer simulation in the ANSYS v.16.0 software package provides a comparative analysis of the stress-strain state of diffusion-welded thermally physically "thin" and "massive" parts when heated in a field of normal glow discharge and discharge in a hollow cathode.

Conclusions. It was established that when heat-physically "massive" heterogeneous bodies are heated in the plasma, unfavorable stress-strain state with stress levels is formed that is 19% higher than the limit of ceramics endurance. Such a node cannot function. At the same time, when welding in Hollow Cathode Glow Discharge the level of stresses occurring in "massive" compounds does not exceed the permissible.

Keywords: glow discharge; stress-strain state; gas-discharge plasma; diffusion welding.

Fig.: 13. **References:** 13.

Болотов Максим Геннадійович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Bolotov Maksym – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of welding technology and CAD/CAM/CAE systems of building structures, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: piligrim.83@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0915-4132>

Scopus: 57190377278

ResearcherID: H-4183-2014

Болотов Геннадій Павлович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Bolotov Gennady – Doctor in Technical Sciences, Doctor, Doctor of Department of welding technology and CAD/CAM/CAE systems of building structures, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: bolotovgp@mail.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0305-2917>

ResearcherID: H-5304-2014

Scopus: 6506157907

Прибытко Ірина Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Prybytko Iryna - PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of welding technology and CAD/CAM/CAE systems of building structures, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: prybytko_ira@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8550-8318>

ResearcherID: F-7325-2014

Новомлинець Олег Олександрович – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, Чернігів, 14035, Україна).

Novomlynets Oleh – Doctor in Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Department of Welding and Automated Engineering Design of Building Constructions, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenko Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: oonl@ukr.net

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0774-434X>

ResearcherID: F-8166-2014

Scopus Author ID: 56938958300; 6507741249

Ярослав Дубик, Ірина Селіверстова, Андрій Богдан

ЗАСТОСУВАННЯ ПОНЯТЬ КОРОТКОГО ТА ДОВГОГО РІШЕНЬ ТЕОРІЇ ОБОЛОНОК ДЛЯ АНАЛІЗУ НДС ТРУБОПРОВОДІВ ІЗ КУТОВОЮ НЕСПІВВІСНІСТЮ

Актуальність теми дослідження. Секторні згини труб мають широке застосування в промисловості, особливо для трубопроводів великого діаметра, також зварні шви на практиці часто мають куту неспіввісність через технологічний процес стику двох прямих частин труби. Тому важливо забезпечити структурну міцність та надійність таких з'єднань, а також покращити здатність секторних згинів зберігати форму та технічні характеристики під впливом навантажень.

Постановка проблеми. Наявні вирази для оцінки напружень у зоні косоного зварного з'єднання отримані на основі узагальнення експериментальних результатів та чисельних розрахунків. Чисельні методи мають значні можливості у вирішенні практичних задач, але не можуть пояснити природу рішення та кількісний ступінь впливу безрозмірних параметрів. Тому важливо розробити аналітичні підходи, що дають гнучкість у аналізі результатів, та виділити найбільш впливові параметри.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розглянуті сучасні публікації в закордонних та вітчизняних джерелах, які пов'язані з цією науковою проблемою.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Робота є продовженням попередніх досліджень авторів, та удосконалює підхід застосування понять коротких та довгих розв'язків у частині точного рішення системи диференціальних рівнянь четвертого ступеня.

Постановка завдання. Отримати аналітичний розв'язок для визначення напруженого стану трубопроводу в зоні куткової неспіввісності зварного шва.

Виклад основного матеріалу. Основна ідея роботи полягає в застосуванні понять короткого та довгого розв'язків теорії оболонок, та їх поєднане використання для аналізу напружено-деформованого стану трубопроводів з кутвою неспіввісністю зварних швів.

Висновки відповідно до статті. Вводяться поняття короткого та довгого розв'язку, які дають можливість замінити рівняння восьмого порядку теорії оболонок, системою з двох рівнянь четвертого порядку. Ефективність розв'язків продемонстровано для двох випадків навантаження (внутрішній тиск та згинальний момент), аналітичні результати порівнюються з чисельними МСЕ та експериментальними даними.

Ключові слова: циліндрична оболонка; кутува неспіввісність; наближений розв'язок, аналітичні рішення; радіальні переміщення.

Рис.: 4. Бібл.: 10.

Актуальність теми дослідження. Зазвичай магістральні трубопроводи при проектуванні моделюються як балки, розрахунок яких на міцність виконується методами будівельної механіки [1]. Не є винятком і ділянки, де замість плавних згинів використовуються секторні згини або мають місце недосконалість геометрії, зумовлені наявністю монтажних неспіввісностей зварних швів [2], або діють додаткові навантаження, наприклад, від використання утяжувачів на ділянках баластування трубопроводу тощо. Проте різка зміна осі трубопроводу в секторних згинах або недосконалість зварних з'єднань при зовнішньому навантаженні внутрішнім тиском або за дії глобального згинального моменту викликають локальні згинальні моменти по товщині стінки труби, які не враховуються в балочних моделях. Під час аналізу додаткових навантажень на ділянках баластування трубопроводів вважається, що гранична вага (стримувальна здатність) утяжувачів і відстань між ними в балочних моделях визначаються з умов рівності глобального згинального моменту його критичному значенню [3; 4]. Однак у місцях опирання утяжувачів виникає локальний напружений стан, що характеризується локальними згинальними моментами в трубопроводі при розгляді його як оболонки з відповідною зміною форми поперечного перерізу (овалізацією).

Постановка проблеми. Розробка точних аналітичних підходів на основі рівнянь теорії оболонок, що враховують локальні недосконалість геометрії та отримання зрозумілих рішень для визначення концентрації напружень з використанням безрозмірних параметрів залишається актуальною науково-технічною проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Незважаючи на достатній обсяг закордонних публікацій [5; 6], присвячених вивченню та аналізу напруженого стану труб із

дефектами геометрії типу кутова неспіввісність у вітчизняній нормативно-технічній літературі відсутні як методи, так і рекомендації щодо їх можливого визначення. Вирази для визначення концентрації напружень біля секторного згину в сучасних стандартах часто замінюються відповідними виразами для гладкого згину труб [7].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Робота є продовженням попередніх досліджень авторів [8] та удосконалює підхід до застосування понять коротких та довгих розв'язків у частині використання точного рішення системи диференціальних рівнянь четвертого ступеня.

Постановка завдання. Отримати аналітичний розв'язок для визначення напруженого стану трубопроводу в зоні кутової неспіввісності зварного шва.

Виклад основного матеріалу. Математичне формулювання. Рівняння рівноваги циліндричної оболонки є загальновідомими [9]:

$$\frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial L}{R \partial \varphi} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial N_\varphi}{R \partial \varphi} + \frac{\partial L}{\partial x} + \frac{Q_\varphi}{R} = 0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_\varphi}{R \partial \varphi} - \frac{N_\varphi}{R} = 0, \quad (3)$$

де N_x, N_φ – осьова та колова сили; L – дотична сила, Q_x, Q_φ – поперечні сили. Також нам знадобляться вирази для поперечних сил, представлені через переміщення:

$$Q_x = D \left[\frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 w}{R^2 \partial x \partial \varphi^2} - \frac{(1 + \mu)}{2R^2} \frac{\partial^2 v}{\partial \varphi \partial x} \right], \quad (4)$$

$$Q_\varphi = D \left[\frac{\partial^3 w}{R^3 \partial \varphi^3} - \frac{\partial^2 v}{R^3 \partial \varphi^2} + \frac{\partial^3 w}{R \partial x^2 \partial \varphi} - \frac{(1 - \mu) \partial^2 v}{2R \partial x^2} \right]. \quad (5)$$

Зазвичай для розв'язку задач теорії оболонок використовують розклад у ряд Фур'є:

$$\Phi = \left(\sum_{n=0} \varphi_n \cos n\varphi \text{ або } \sum_{n=1} \varphi_n \sin n\varphi \right). \quad (6)$$

Нижче розглянемо поняття короткого та довгого рішень теорії оболонок, скористаємось припущенням, що амплітуда радіальних переміщень $w > (v, u)$ завжди більша, ніж інші компоненти переміщень.

Коротке рішення

Припустимо, що $d^2 \Phi / dx^2 \gg d^2 \Phi / (R d\varphi)^2$, тоді, враховуючи (4)–(5) $Q_\varphi \ll Q_x$, можемо знехтувати Q_φ у системі (2). Виключаючи L в (1), ми отримаємо що $\partial^2 N_\varphi / \partial \varphi^2 \approx \partial^2 N_x / \partial x^2$. Згідно з нашим припущенням, ми можемо записати $N_\varphi \gg N_x$. Таким чином, ми можемо стверджувати, що

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \partial u / \partial x \approx -\mu \varepsilon_\varphi, \\ N_\varphi &= -H(1 - \mu^2) \varepsilon_\varphi = -Eh \varepsilon_\varphi. \end{aligned} \quad (7)$$

Підставляючи (7) в (2), отримуємо:

$$E \frac{\partial \varepsilon_\varphi}{R \partial \varphi} + G \frac{\partial^2 u}{R \partial x \partial \varphi} + G \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = \frac{\partial \varepsilon_\varphi}{R \partial \varphi} (E - \mu G) + G \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = \frac{\partial w}{R^2 \partial \varphi} + \left(\frac{G}{E - \mu G} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{R^2 \partial \varphi^2} \right) = 0. \quad (8)$$

Враховуючи характер функції, ми можемо зробити висновок із (8), що $\partial v / \partial \varphi \ll w$, та $\varepsilon_\varphi \approx w / R$. Тому:

$$N_\varphi = -Ehw / R. \quad (9)$$

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Підставивши (9) у (3) з врахуванням (4)–(5), нехтуючи кільцевими переміщеннями, ми отримаємо диференційне рівняння 4-го порядку відносно $w(x, \varphi) = \Phi_n(x) \cdot \cos(n\varphi)$:

$$\frac{d^4 \Phi_n(x)}{dx^4} - 2A \frac{d^2 \Phi_n(x)}{dx^2} + B \Phi_n = 0, \text{ де} \tag{10}$$

$$A = \mu \frac{n^2}{R^2}, \quad B = \left(\frac{n}{R}\right)^4 + 12 \frac{(1-\mu^2)}{R^2 h^2}$$

I, нехтуючи зростаючими членами, отримаємо розв'язок (10):

$$\Phi_n(x) = C_1 e^{-c_n x} \cos(d_n x) + C_2 e^{-c_n x} \sin(d_n x), \tag{11}$$

де $\rho \cos \psi = c_n, \rho \sin \psi = d_n, \rho^2 = \sqrt{A^2 + D^2}, 2\psi = \arctg(D/A)$. Коротке рішення характеризується чотирма головними параметрами: це радіальне переміщення w , кут повороту γ_x , осьовий момент M_x та поперечна сила Q_x . Для останніх двох параметрів маємо такі вирази:

$$M_x = H\delta \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{R^2 \partial \varphi^2} \right); \quad Q_x = D \left(\frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 w}{R^2 \partial x \partial \varphi^2} \right) \tag{12}$$

У кінцевому вигляді короткий розв'язок представимо:

$$w = (C_1 F_1(x) + C_2 F_2(x)) \cos(n\varphi) \tag{13}$$

$$\gamma_x = -(C_1 (-aF_1(x) - bF_2(x)) + C_2 (-aF_2(x) + bF_1(x))) \cos(n\varphi) \tag{14}$$

$$M_x = H\delta \left[\begin{array}{l} C_1 (F_1(x)((a)^2 - (b)^2) + 2abF_2(x)) + \\ C_2 (F_2(x)((a)^2 - (b)^2) - 2baF_1(x)) \end{array} \right] - \mu \frac{n^2}{R^2} (C_1 F_1(x) + C_2 F_2(x)) \cos(n\varphi) \tag{15}$$

$$Q_x = D \left[\begin{array}{l} C_1 ((-a)^3 + 3a(b)^2) F_1(x) + ((b)^3 - 3b(a)^2) F_2(x) + \\ C_2 (-a)^3 + 3a(b)^2 F_2(x) + (-b)^3 + 3b(a)^2 F_1(x) - \\ - \frac{n^2}{R^2} (C_1 (-aF_1(x) - bF_2(x)) + C_2 (-aF_2(x) + bF_1(x))) \end{array} \right] \cos(n\varphi) \tag{16}$$

$$v(x, \varphi) = \left[\begin{array}{l} \left(\frac{n(2C_2 ab(\mu + 2) + C_1(\mu + 2)(a^2 - b^2))}{R^2(a^2 + b^2)^2} \right) F_1(x) + \\ + \left(-\frac{n(2C_1 ab(\mu + 2) + C_2(\mu + 2)(b^2 - a^2))}{R^2(a^2 + b^2)^2} \right) F_2(x) \end{array} \right] \sin(n\varphi) \tag{17}$$

$$u(x, \varphi) = (A_1 F_1(x) + A_2 F_2(x)) \cos(n\varphi) = \left(\frac{\mu(C_1 a + C_2 b)}{R(a^2 + b^2)} F_1(x) - \frac{\mu(C_1 b + C_2 a)}{R(a^2 + b^2)} F_2(x) \right) \cos(n\varphi) \tag{18}$$

$$L(x, \varphi) = [(E_1 C_1 + E_2 C_2) F_1(x) - (E_2 C_1 - E_1 C_2) F_2(x)] \sin(n\varphi)$$

$$E_1 = - \left(\frac{R^4(a^4 - 2a^2 b^2 - 3b^4) - 2R^2 \mu n^2(a^2 + b^2) + 2R^2 \mu(a^2 + b^2) - R^2(a^2 + b^2) + n^4 - n^2}{(a^2 + b^2)R^4} \right) aDn \tag{19}$$

$$E_2 = \left(\frac{R^4(3a^4 + 2a^2 b^2 - b^4) - 2R^2 \mu n^2(a^2 + b^2) + 2R^2 \mu(a^2 + b^2) - R^2(a^2 + b^2) - n^4 + n^2}{(a^2 + b^2)R^4} \right) bDn$$

$$N_x(x, \varphi) = \left[\begin{array}{l} \left(\frac{C_1(E_1 a - E_2 b)n}{(a^2 + b^2)R} + \frac{C_2(E_1 b + E_2 a)n}{(a^2 + b^2)R} \right) F_1(x) + \\ \left(-\frac{C_1(E_1 b + E_2 a)n}{(a^2 + b^2)R} + \frac{C_2(E_1 a - E_2 b)n}{(a^2 + b^2)R} \right) F_2(x) \end{array} \right] \cos(n\varphi) \tag{20}$$

Тут введено функції $F_1(x) = e^{-c_n x} \cos(d_n x)$, $F_2(x) = e^{-c_n x} \sin(d_n x)$. Крім чотирьох основних параметрів коротке рішення (13)–(16) породжує довге рішення (17)–(20) для визначення: колового переміщення v , осьового переміщення u , бічної сили L та осьової сили N_x , вирази для яких отримано в явному вигляді.

Зауважимо, що при $n=0$ коротке рішення – добре відомий вісесиметричний краєвий ефект у циліндричних оболонках, який розглянуто у більшості підручниках з опору матеріалів, при цьому $L = N_x \equiv 0$.

Довге рішення

Припустимо, що $d^2\Phi/dx^2 \ll d^2\Phi/(Rd\varphi)^2$, тоді з (3) та (4)–(5) отримаємо, що $\partial Q_\varphi / \partial \varphi \approx N_\varphi$. Потім виключаємо дотичну силу з (1) та (2), відповідно отримаємо, що $\partial^2 N_\varphi / \partial \varphi^2 \approx \partial^2 N_x / \partial x^2$. Згідно з нашим припущенням, $N_\varphi \ll N_x$. Тепер можна стверджувати, що $\varepsilon_\varphi \approx -\mu\varepsilon_x$, та:

$$N_x = -H(1 - \mu^2) = -Eh(\partial u / \partial x). \quad (21)$$

Продиференціюємо рівняння (3) відносно кутової координати φ один раз та віднімемо від рівняння (2). Диференціюючи отримане рівняння один раз по координаті φ і замінивши його на співвідношення (1), яке було продиференційовано по координаті x , отримуємо таке рівняння:

$$\frac{\partial^2 N_x}{\partial x^2} - \frac{1}{R} \frac{\partial^3 Q_x}{\partial \varphi^2 \partial x} - \frac{1}{R^2} \frac{\partial Q_\varphi}{\partial \varphi} - \frac{1}{R^2} \frac{\partial^3 Q_\varphi}{\partial \varphi^3} = 0. \quad (22)$$

Підставляючи значення поперечних сил (4) та (5) і виражаючи N_x з (21), рівняння (22) буде записано через функції $u(x, \varphi)$, $v(x, \varphi)$, $w(x, \varphi)$. У цьому випадку, згідно з припущеннями $\frac{\partial v}{\partial \varphi} \approx -w$ та $\frac{1}{R} \frac{\partial u}{\partial \varphi} = -\frac{\partial v}{\partial x}$, вираз (22) можна представити лише через тангенціальні переміщення $v(x, \varphi, t)$:

$$\frac{\partial^4}{\partial x^4} \left(\frac{\partial^4 v}{\partial \varphi^4} + \frac{R^2 12(1 - \mu^2)}{h^2} v \right) + \frac{1}{2R^2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[\left(2 \frac{\partial^3}{\partial \varphi^3} + \frac{\partial}{\partial \varphi} \right)^2 v - \mu \frac{\partial^2 v}{\partial \varphi^2} \right] + \frac{1}{R^4} \left[\left(\frac{\partial^4}{\partial \varphi^4} + \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} \right)^2 v \right] = 0. \quad (23)$$

Представимо переміщення $v(x, \varphi)$ як $v(x, \varphi) = \Phi(x) \cdot \sin(n\varphi)$, тоді рівняння (23) перепишеться:

$$\frac{d^4 \Phi(x)}{dx^4} - 2A \frac{d^2 \Phi(x)}{dx^2} + B \Phi(x) = 0, \quad (24)$$

$$\text{де } A = \frac{1}{R^2} \frac{n^6 - n^4 + \frac{n^2(1 - \mu)}{4}}{n^4 + \frac{R^2 12(1 - \mu^2)}{h^2}}; \quad B = \frac{1}{R^4} \frac{n^4(n^2 - 1)^2}{n^4 + \frac{R^2 12(1 - \mu^2)}{h^2}}$$

І, знову нехтуючи зростаючими членами, отримаємо розв'язок:

$$\Phi(x) = C_1 e^{-a_n x} \cos(b_n x) + C_2 e^{-a_n x} \sin(b_n x). \quad (25)$$

де $\rho \cos \psi = a_n$, $\rho \sin \psi = b_n$, $\rho^2 = \sqrt{A^2 + D^2}$, $2\psi = \arctg(D/A)$, $B - A^2 = D^2$. Зауважимо, що a_n та b_n тотожно дорівнюють нулю при $n=0,1$, тому довгий розв'язок існує лише при $n \geq 2$.

Довге рішення характеризується чотирма основними змінними - v , u , N_x та L , які з використанням розв'язку (25) представимо таким чином:

$$v = (C_3 F_3(x) + C_4 F_4(x)) \sin(n\varphi) \quad (26)$$

$$u(x, \varphi) = -\frac{R}{n} (C_3 a + C_4 b F_3(x) - (C_3 b + C_4 a) F_4(x)) \cos(n\varphi) \quad (27)$$

$$N_x = (B_3 F_3(x) + B_4 F_4(x)) \cos(n\varphi) = \left[\begin{array}{l} \left(\frac{HR}{n} (C_3 \mu^2 (a^2 - b^2) - 2C_4 ab (\mu^2 - 1) - C_3 (a^2 - b^2)) \right) F_3(x) + \\ \left(\frac{HR}{n} (2C_3 ab (\mu^2 - 1) + C_4 \mu^2 (a^2 - b^2) - 2C_4 (a^2 - b^2)) \right) F_4(x) \end{array} \right] \cos(n\varphi) \quad (28)$$

$$L_{x\varphi} = (E_3 F_3(x) + E_4 F_4(x)) \sin(n\varphi) = \left[\begin{array}{l} \left(\frac{HR^2}{n^2} (C_3 \mu^2 (a^3 - 3ab^2) + C_4 \mu^2 (b^3 - 3a^2b) + \right. \\ \left. C_3 (3ab^2 - a^3) + C_4 (3a^2b - b^3) \right) F_3(x) + \\ \left(\frac{HR^2}{n^2} (C_3 \mu^2 (3ab^2 - b^3) + C_4 \mu^2 (a^3 - 3ab^2)) \right. \\ \left. + C_3 (b^3 - 3a^2b) + C_4 (3ab^2 - a^3) \right) F_4(x) \end{array} \right] \sin(n\varphi) \quad (29)$$

$$w = -(C_3 F_3(x) + C_4 F_4(x)) \cos(n\varphi) n \quad (30)$$

$$\gamma_x = (F_3(x) (C_4 b - C_3 a) - F_2(x) (C_3 b + C_4 a)) \cos(n\varphi) n \quad (31)$$

$$Q_x = \left[\frac{H\delta n}{2R^2} \left(F_3(x) C_3 a (2R^2 a^2 - 6R^2 b^2 - 2n^2 + \mu + 1) + F_3(x) C_4 b (2R^2 b^2 - 6R^2 a^2 + 2n^2 - \mu - 1) + \right. \right. \\ \left. \left. F_4(x) C_3 b (6R^2 a^2 - 2R^2 b^2 - 2n^2 + \mu + 1) + F_4(x) C_4 a (2R^2 a^2 - 6R^2 b^2 - 2n^2 + \mu + 1) \right) \right] \cos(n\varphi) \quad (32)$$

$$M_x = \left[-\frac{H\delta n}{R^2} \left(F_3(x) (C_3 R^2 a^2 - C_3 R^2 b^2 - C_3 \mu n^2 + C_3 \mu - 2C_4 R^2 ab) + \right. \right. \\ \left. \left. F_4(x) (2C_3 R^2 ab + C_4 R^2 a^2 - C_4 R^2 b^2 - C_4 \mu n^2 + C_4 \mu) \right) \right] \cos(n\varphi) \quad (33)$$

Тут введено функції $F_n^3(x) = e^{-a_n x} \cos(b_n x)$; $F_n^4(x) = e^{-a_n x} \sin(b_n x)$. Крім чотирьох основних параметрів, довге рішення (26)–(29) породжує коротке рішення (30)–(33) для радіального переміщення w , куту нахилу γ_x , поперечної сили Q_x та моменту M_x , вирази для яких отримано в явному вигляді.

Аналіз трубопроводу з кутовою неспіввісністю зварного шва.

Сформулюємо граничні умови для визначення силових та геометричних параметрів для різних типів навантаження. Їх можна отримати шляхом проектування сил з прямого сегмента на сили «косой» ділянки, за малих значень кутової неспіввісності [8]:

$$\begin{aligned} N'_x &= N_x^b \cos \theta + L^b \sin \theta \cos \varphi; \\ L' &= N_\phi^b \cos \varphi \sin \theta - N_x^b \cos \varphi \sin \theta + L^b; \\ Q'_x &= -N_x^b \sin \theta \sin \varphi. \end{aligned} \quad (34)$$

Навантаження внутрішнім тиском

У цьому випадку тільки дві сили діють на прямій ділянці труби: $N_x^b = \frac{-pR}{2}$ та $N_\phi^b = -pR$. З (34) впливають такі граничні умови:

$$L' \approx \frac{-pR}{2} \sin \theta \cos \varphi; \quad Q' \approx \frac{pR}{2} \sin \theta \sin \varphi. \quad (35)$$

Із урахуванням симетрії задачі також повинна виконуватись гранична умова $\gamma_x|_{x=0} = 0$. Розглянемо короткий розв'язок для $n=0$, в цьому випадку необхідним є виконання граничних умов для γ_x, Q_x , оскільки в короткому розв'язку вони є головними змінними. Таким чином з (14) та (16) ми знаходимо дві константи C_1, C_2 , та можемо знайти всі інші змінні. Для параметру L визначальним є вираз (19), який дорівнює граничній умові для L' , тобто при $n=0$ рішення врівноважується, та не переходить у довгий розв'язок. На рис. 1

показано розподіл осьових σ_x та колових σ_ϕ напружень вздовж осьової координати, за дії внутрішнього тиску 3,8 МПа, та половини кута секторного згину – 2°.

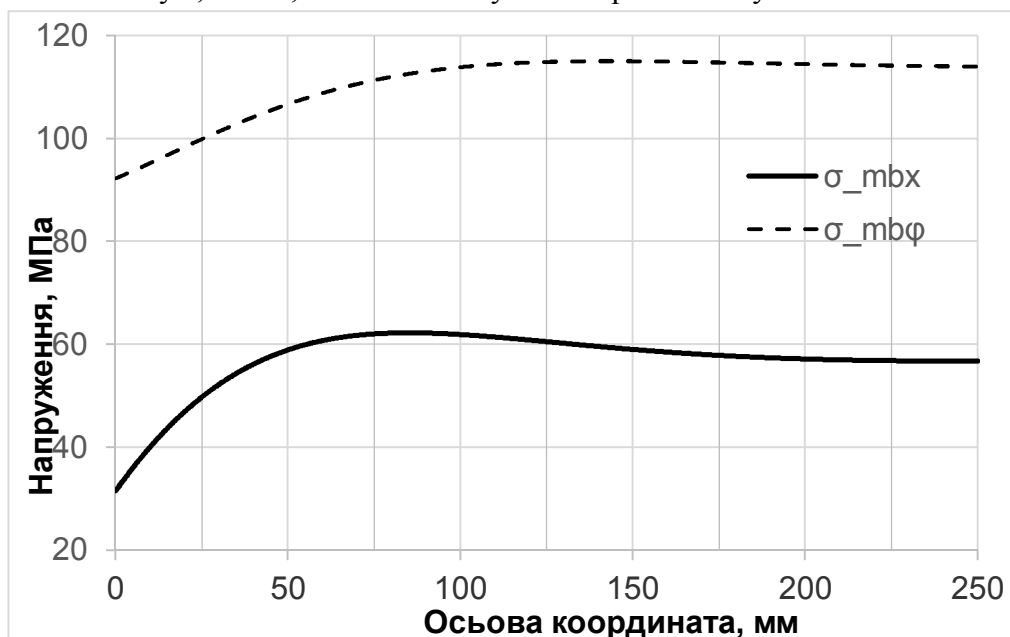


Рис. 1. Осьові та колові напруження для $R = 381$ мм $h = 12,7$ мм

За дії внутрішнього тиску аналітичний розв'язок повністю збігається з чисельним, отриманим з використанням МСЕ, тому останній не наведено на рис. 1.

Навантаження згинальним моментом

Для прямої ділянки труби $N_x^b = \sigma_m h \sin \phi$, а граничні умови запишуться:

$$L' \approx \frac{1}{2} \sigma_m h \sin \theta \sin 2\phi; \quad Q' \approx \frac{\sigma_m h \sin \theta}{2} (1 - \cos 2\phi). \quad (36)$$

Знову розпочнемо з короткого розв'язку. При $n=0$ з рівнянь $\gamma_x|_{x=0} = 0$ та $Q_x|_{x=0} = \frac{\sigma_m h \sin \theta}{2}$, знаходимо дві константи C_1, C_2 , і можемо визначити всі інші змінні. Далі розглянемо короткий розв'язок при $n=2$. Використовуючи задані граничні умови (36) отримуємо, що розв'язок не врівноважується, оскільки породжує силу L , яка відмінна від граничної умови. Неврівноважену частину представимо

$L^{long} = L' - L^{short} = \frac{3}{2} \sigma_m h \sin \theta \sin 2\phi$, яка буде виступати граничною умовою для довгого рішення при $n=2$, разом з умовою симетрії $u^{long} = 0$. Отримані значення радіальних та колових переміщень, мають проекцію переміщення на u в косому перерізі

$$u^{obl} = w_2^{long} \sin \phi \sin \theta + v_2^{long} \cos \phi \sin \theta + u^{str} \cos \theta \quad (37)$$

Очевидно, що $u^{obl} = 0$, тому вираз $u^{str} = -(1/2 w_2^{long} + 1/2 v_2^{long}) \tan \theta$ є граничною умовою при $n=3$ з урахуванням $L^{long}|_{x=0} = 0$. Розв'язок при $n=4$ не розглядаємо через малі значення отриманих сил.

Отримані результати для локальних сил і моментів дозволяють знайти вирази для колових та осьових напружень:

$$\sigma_\phi = \frac{(N_\phi)^{short} + (N_\phi)^{long}}{h} \pm \frac{6 \left((M_\phi)^{short} + (M_\phi)^{long} + \mu \left((M_x)^{short} + (M_x)^{long} \right) \right)}{h^2}. \quad (38)$$

$$\sigma_x = \sigma_m \sin \phi + \frac{(N_x)^{short} + (N_x)^{long}}{h} \pm \frac{6 \left((M_x)^{short} + (M_x)^{long} + \mu \left((M_\phi)^{short} + (M_\phi)^{long} \right) \right)}{h^2}. \quad (39)$$

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Компоненти (38) та (39) описуються відповідними виразами сил та моментів та їх сумою при різних значеннях n .

Розроблений підхід протестовано для зварного з'єднання труб зі значенням половини кута секторного згину рівного 2° , до якого прикладено згинальний момент 5647 kip·in (рис. 2–3). Представлено також порівняння результатів аналітичного розрахунку з розрахунком за МСЕ [10], експериментальними даними [10] та власним чисельним розрахунком (рис. 4). Видно, що результати мають досить добру збіжність.

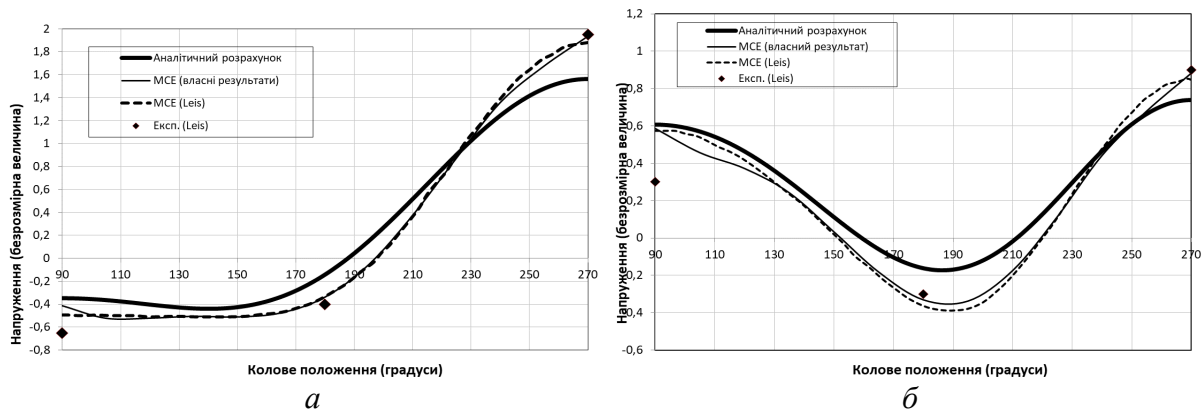


Рис. 2. Розподіл напружень на зовнішній поверхні для труби $R = 381$ мм:
а – осьові напруження, б – колові напруження

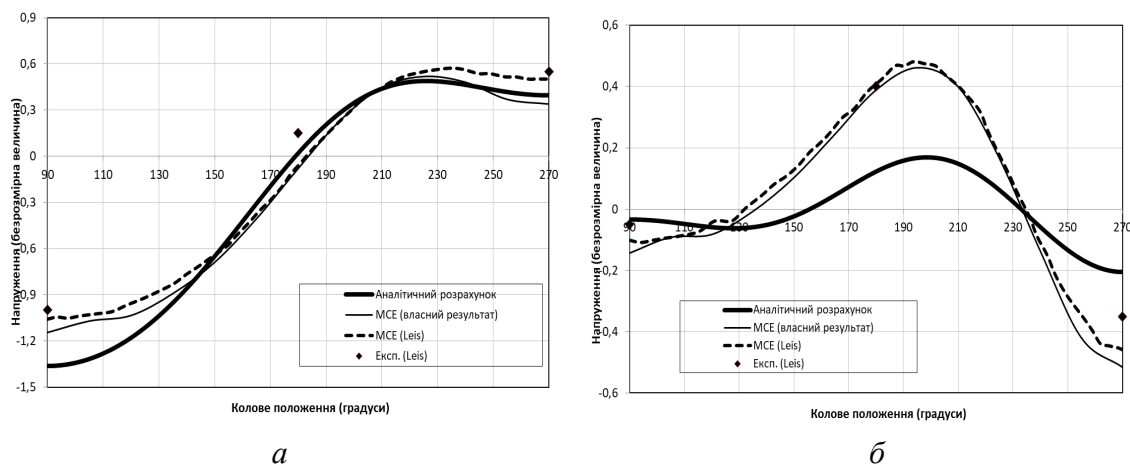


Рис. 3. Розподіл напружень на внутрішній поверхні для труби
 $R = 381$ мм; $h = 12,7$; $E = 2e5$ МПа; $\mu = 0,3$:
а – осьові напруження, б – колові напруження

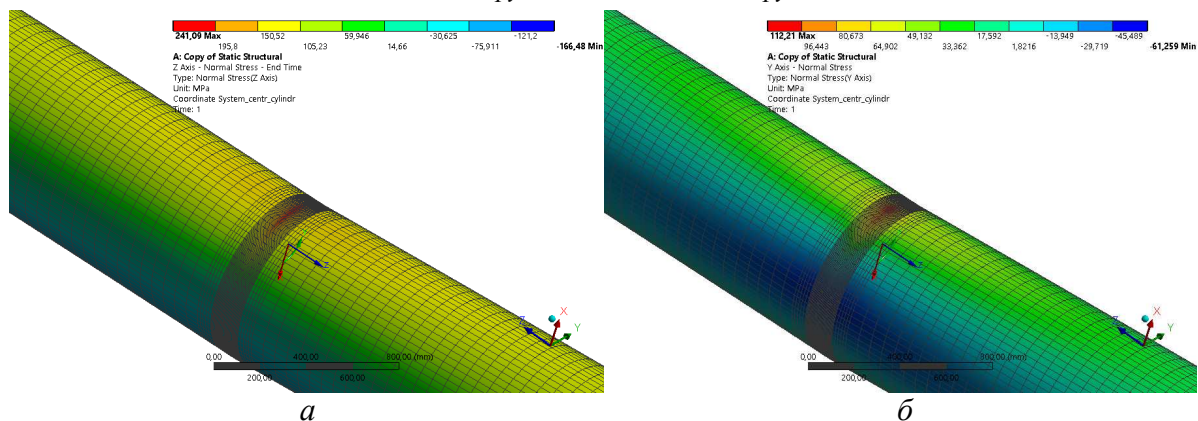


Рис. 4. МСЕ результати:
а – розподіл осьових напружень; б – розподіл колових напружень

Висновки відповідно до статті. У роботі представлено можливість сумісного використання короткого та довгого рішень теорії оболонки, де всі змінні є сумою результатів цих рішень, а необхідність їх поєднання виникає із задоволення граничних умов. Для зручного використання даних рішень, нами отримано в явному вигляді записи для всіх основних змінних: радіального переміщення w , кута нахилу γ_x , поперечної сили Q_x та моменту M_x (головні змінні короткого рішення), а також колового переміщення v , осевого переміщення u , бічної сили L та осевої сили N_x (головні змінні довгого рішення).

Отримані залежності використано до аналізу НДС трубопроводу з кутовою неспіввісністю. Показано, що в деяких простих випадках навантажень, наприклад за дії на трубопровід з кутовою неспіввісністю лише внутрішнього тиску, можна обмежитись лише коротким розв'язком, що повністю збігається з чисельним аналізом. Для більш складного випадку, наприклад, за дії згинального моменту, для задоволення граничних умов виникає необхідність використання як короткого, так і довгого розв'язків. Отриманий аналітичний розв'язок добре узгоджується з чисельними та експериментальними даними.

Результати даного чисельно-аналітичного дослідження будуть корисні для аналізу за МСЕ, коли при побудові розрахункової моделі важливо знати межі прямих ділянок труб біля секторного згину, які впливають на граничні умови скінченноелементної моделі, а також для оцінки концентрації напружень від наявності кутових неспіввісностей зварних швів, які можуть бути використані в нормативних документах нафто-газової галузі.

Список використаних джерел

1. СНиП 2.05.06-85. Магистральные трубопроводы. Строительные нормы и правила. Москва: ЦИТП Госстроя СССР, 1985. 52 с.
2. ДСТУ-Н Б В.2.3-21:2008. Магістральні трубопроводи. Настанова. Визначення залишкової міцності магістральних трубопроводів з дефектами. Київ. Мінрегіонбуд, 2008. 56 с.
3. Ориняк І., Лохман І., Богдан А. Використання моделі кільця для аналізу напружень у трубопроводах з дефектами форми. *Машинознавство*. 2011. № 9-10. С. 3-13. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/maz_2011_9-10_3.
4. Лукаевич С. Локальные нагрузки в пластинах и оболочках. Москва: Мир, 1982. 542 с.
5. Zhu X., Leis B., Feier I. Stress analysis of miter joint in pipeline under internal pressure or in-plane bending. *Proceedings of the ASME 2010 Pressure Vessels and Piping Conference PVP2010-25268* (Bellevue, July 18-22, 2010).
6. Zheng G., Colquhoun I., Paviglianiti J. Integrity of small mitered joints. *Proceedings of the 2016 11th International Pipeline Conference IPC2016-64101* (Alberta, September 26-30, 2016).
7. ASME B31.8-2014. Gas Transmission and Distribution Piping Systems. STANDARD by ASME International, 09/30/2014.
8. Orynyak I., Bogdan A., Selivestрова I. The Application of Long and Short Cylindrical Shell Solutions for Stress and Flexibility Determination in a Single Mitred Bend. *Proceedings of the ASME 2016 Pressure Vessels and Piping Conference PVP2016-63598* (Vancouver, July 17-21, 2016).
9. Orynyak I., Dubyk Y. Approximate Formulas for Cylindrical Shell Free Vibration Based on Vlasov's and Enhanced Vlasov's Semi-Momentless Theory. *Proceedings of the ASME 2018 Pressure Vessels and Piping Conference PVP2018-84932* (Czech Republic, July, 15-20, 2018). Prague, 2018. P. 10.
10. Feier I. I., Leis B. N., Zhu X. K., Stonesifer R. B., Stavrakas J. S. and D'Eletto D. Experimental strain measurements on large diameter mitred pipe joints. *Proceedings of the 8th International Pipeline Conference*, September 27 – October 1, 2010, Calgary, Alberta, Canada, IPC2010-31583.

References

1. SNIP 2.05.06-85. *Magistralnye truboprovody. Stroitelnye normy i pravila [Main pipelines. Building regulations]* (1985). Moscow: TsITP Gosstroia SSSR [in Russian].
2. DSTU-N B.2.3.-21:2008. *Mahistralni truboprovody. Nastanova. Vyznachennia zalyshkovoi mitsnosti mahistralnykh truboprovodiv z defektamy [Main pipelines. Attitude. Determination of the residual strength of main pipelines with defects]* (2008). Kyiv. Minrehionbud [in Ukrainian].

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

3. Oryniak, I. V., Lokhman, I. V., Bohdan, A. V. (2011). Vykorystannia modeli kiltsia dlia analizu napruzhen v truboprovodakh z defektamy formy [Using the ring model to analyze stresses in pipelines with defects in the form]. *Mashinoznavstvo – Machinization*, 9-10, 3-13. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/maz_2011_9-10_3.
4. Lukasevich, S. (1982). *Lokalnye nagruzki v plastinakh i obolochkakh [Local loads in plates and shells]*. Moscow: Mir [in Russian].
5. Zhu, X., Leis, B., Feier, I. (2010). Stress analysis of miter joint in pipeline under internal pressure or in-plane bending. Proceedings of the *ASME 2010 Pressure Vessels and Piping Conference PVP2010-25268* (Bellevue, July 18-22, 2010) [in English].
6. Zheng, G., Colquhoun, I., Paviglianiti, J. (2016). Integrity of small mitred joints. Proceedings of the *2016 11th International Pipeline Conference IPC2016-64101* (Alberta, September 26-30, 2016).
7. *ASME B31.8-2014*. Gas Transmission and Distribution Piping Systems. STANDARD by ASME International, 09/30/2014 [in English].
8. Orynyak, I., Bogdan, A., Selivestrova, I. (2016). The Application of Long and Short Cylindrical Shell Solutions for Stress and Flexibility Determination in a Single Mitred Bend. Proceedings of the *ASME 2016 Pressure Vessels and Piping Conference PVP2016-63598* (Vancouver, July 17-21, 2016) [in English].
9. Orynyak, I., Dubyk, Y. (2018). Approximate Formulas for Cylindrical Shell Free Vibration Based on Vlasov's and Enhanced Vlasov's Semi-Momentless Theory. Proceedings of the *ASME 2018 Pressure Vessels and Piping Conference PVP2018-84932* (Czech Republic, July, 15-20, 2018) (pp. 10). Prague [in English].
10. Feier, I. I., Leis, B. N., Zhu, X. K., Stonesifer, R. B., Stavrakas, J. S. and D'Eletto D. (2010). Experimental strain measurements on large diameter mitred pipe joints. Proceedings of the *8th International Pipeline Conference*, September 27 – October 1. Calgary, Alberta, Canada, IPC2010-31583 [in English].

UDC 539.4

Yaroslav Dubyk, Iryna Seliverstova, Andrii Bogdan

APPLICATION OF SHORT AND LONG CYLINDRICAL SHELL SOLUTIONS FOR STRESS-STRAIN STATE ANALYSIS IN PIPES WITH ANGULAR MISALIGNMENT

Urgency of the research. Mitred bends of pipes are widely used in industry. However, the weld seam in practice is often slanted due to the process of joining two straight portions of the pipe. Therefore, it is important to provide structural strength and reliability, as well as improve the ability of pipes to maintain shape and performance under the influence of loads.

Target setting. Existing expressions for the estimation of stresses in the region of the oblique weld joint mainly derive from the synthesis of experimental results and numerical calculations. Numerical methods have significant capabilities in solving practical problems, but can not explain the nature of the solution and the quantitative degree of influence of dimensionless parameters. Therefore, it is important to develop analytical approaches with easy-to-understand solutions and dimensionless parameters.

Actual scientific researches and issues analysis. The modern publications in foreign and domestic sources that are related to this research problem.

Uninvestigated parts of general matters defining. The work is a continuation of previous studies authors and application approach improves short and long terms solutions in terms of exact solutions of differential equations of the fourth degree.

The research objective. Get the analytical solution for the determination of the stress state of the pipeline in the area of angular misalignment of weld.

The statement of basic materials. The main idea of the work is to apply the concepts of short and long solutions of the theory of shells, and their combined use for the analysis of the stress-strain state of pipelines with angular inequilibrium of welds.

Conclusions. The concepts of short and long solutions are introduced, which make it possible to replace the equation of the eighth order of the theory of shells, a system of two equations of the fourth order. The efficiency of the solutions is demonstrated for two load cases (internal pressure and bending moment), analytical results are compared with the number of FEM and experimental data.

Keywords: cylindrical shell; angle inequality; approximate solution; analytical solutions; radial displacement.

Fig.: 4. References: 10.

Дубик Ярослав Романович – кандидат технічних наук, завідувач відділу розрахунків на міцність, ТОВ «ІПП - Центр» (вул. Болсуновська, 8, м. Київ, 01014, Україна).

Dubyk Yaroslav – PhD in Technical Sciences, Head of department for strength calculations, LLC IPP Centre (8 Bolsunovska Str., 01014 Kyiv, Ukraine).

E-mail: dubykir@gmail.com.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4327-412X>

ResearcherID: P-2926-2016

Scopus Author ID: 56050505200

Селіверстова Ірина Павлівна – аспірант, молодший науковий співробітник, Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренко НАН України (вул. Тимірязєвська, 2, м. Київ, 01014, Україна).

Seliverstova Iryna – PhD student, Junior Researcher, G. S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the National Academy of Sciences of Ukraine (2 Timiryazevska Str., 01014 Kyiv, Ukraine).

E-mail: seliverstovairyna24@gmail.com.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1166-792X>

ResearcherID: F-2267-2019.

Богдан Андрій Васильович – кандидат технічних наук, завідувач відділом експертиз та продовження ресурсу, ТОВ «ІПП - Центр» (вул. Болсуновська, 8, м. Київ, 01014, Україна).

Bogdan Andrii – PhD in Technical Sciences, Head of department of expertises and operation lifetime prolongation, LLC IPP Centre (8 Bolsunovskaya Str., 01014, Kyiv, Ukraine).

E-mail: bohdan-av@ipp-centre.com.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9795-8319>

ResearcherID: F-2406-2019

Scopus Author ID: 18041728100

Олексій Герасименко, Олег Марков

РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ГАРЯЧОГО ДЕФОРМУВАННЯ

Актуальність теми дослідження. Технологічні процеси кування великогабаритних поковок відповідального призначення потребують точного встановлення технологічних режимів процесу деформування. Це потрібно для забезпечення високої якості та оптимальних витрат при виготовленні виробів вагою від 20 до 200 тон. Оптимальні технологічні режими кування можна встановити на основі даних напружено-деформованого стану заготовки при куванні.

Постановка проблеми. Кування великих поковок є дрібносерійним та одиничним видом дороговартісного виробництва з низькою ліквідністю, тому ці процеси потребують попереднього скінчено-елементного моделювання напружено-деформованого стану та силових параметрів кування. Моделювання повинно дозволяти точно встановлювати напружено-деформований стан заготовки в процесі кування.

Аналіз досліджень і публікацій. На основі аналізу публікацій за останні роки було встановлено, що основну увагу при моделюванні процесів кування великих поковок методом скінчених елементів приділяли формозміненню заготовки при використанні нових способів кування та деформуючого інструменту.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Існуючі програмні пакети для моделювання процесів гарячого деформування на основі методу скінчених елементів не дозволяють враховувати процеси релаксації напружень, які відбуваються при температурах рекристалізації. Це пов'язано з відсутністю аналітичного зв'язку компонент швидкостей деформацій та напружень, які б враховували цю релаксацію. Врахування релаксації напружень дозволить точніше встановлювати напружений та деформований стан заготовки, а отже, енергосилові параметри процесу кування.

Метою статті є встановлення аналітичного зв'язку компонент тензорів напружень та швидкостей деформації, який би враховував релаксацію напружень при реалізації операції гарячого деформування, що дозволить підвищити точність визначення напружено-деформованого стану та силові параметри процесів кування великогабаритних поковок.

Виклад основного матеріалу. У роботі показано, що при моделюванні процесів кування та штампування необхідно враховувати не тільки процеси зміцнення матеріалу, але й релаксацію напружень, які відбуваються при гарячій обробці. На основі в'язко-пружної моделі Максвелла був встановлений зв'язок компонент тензору швидкостей деформацій та напружень. Розроблена модель дозволяє враховувати релаксацію напружень металу під час гарячої деформації. Отримана математична модель перевірялась експериментом на різних сталях при різних температурах деформування.

Висновки і пропозиції. Експериментально встановлено, що розроблена модель на 90...93 % описує реологію металу при гарячому деформуванні. Установлений зв'язок компонент швидкостей деформацій та напружень дозволить одержувати прямий чисельний розв'язок завдань пластичного деформування без ітераційних процедур МСЕ з урахуванням реальних властивостей металу при деформації, що суттєво зменшує кількість ітерацій та час розрахунків.

Ключові слова: гаряча деформація; зміцнення; розміцнення; релаксація напружень; МСЕ; крива зміцнення.
Рис.: 2. Бібл.: 15.

Актуальність теми дослідження. Технологічні процеси кування великогабаритних поковок відповідального призначення потребують точного встановлення технологічних режимів процесу деформування. Це потрібно для забезпечення високої якості та оптимальних витрат при виготовленні виробів вагою від 20 до 200 тон. Оптимальні технологічні режими кування можна встановити на основі даних напружено-деформованого стану заготовки при куванні.

Постановка проблеми. Кування великих поковок є дрібносерійним та одиничним видом дороговартісного виробництва з низькою ліквідністю, тому ці процеси потребують попереднього скінчено-елементного моделювання напружено-деформованого стану та силових параметрів кування. Моделювання повинно дозволяти точно встановлювати напружено-деформований стан заготовки в процесі кування [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. При розв'язку крайових задач обробки тиском однією з фундаментальних проблем є врахування фізичної нелінійності властивостей металу, що деформується. У цей час розроблені й широко використовуються ітераційні методи лінеаризації фізично нелінійних завдань, що передбачають зазвичай елементну апроксимацію розв'язку. Найбільше часто використовують метод пружних розв'язків, метод гідродинамічних наближень тощо [2]. У роботі [3] отримане узагальнення цього виразу для випадку фізичної нелінійності середовищ, які деформуються.

Останнім часом значне поширення одержали чисельні методи [4], які дозволяють визначити переміщення та швидкості деформації. До недоліку цих методів належить зміна форми заготовки в процесі деформації, що приводить до зміни ходу рішення.

На сьогодні найпоширенішим чисельним методом рішення завдань обробки металів тиском (ОМТ) є метод скінчених елементів (МСЕ) [5], що дозволяє вирішувати нелінійні задачі фізики й визначати утворення внутрішньої будови після деформації. Результати МСЕ з високою точністю узгоджуються з експериментальними даними [6]. МСЕ набув свій розвиток стосовно дослідження НДС металу в пластичному стані лише в останні роки [7].

Для рішення завдань пружно-пластичних деформацій із в'язким зламом при більших ступенях деформацій також застосовують програми МСЕ [8]. Оптимізація процесів ОМТ базується на ефективному аналізі з використанням моделювання МСЕ й інтегрованої програми обробки даних структурних змінень, що відбуваються в процесі кування.

Тривимірний жорстко-пластичний аналіз МСЕ був застосований для оптимізації процесу кування при виробництві поковок [9] і був спрямований на встановлення впливу швидкості, подачі й кута повороту для оптимізації технологічних переходів кування. На прикладі технологічного процесу кування [10] викладений новий принцип побудови технологічних процесів ОМТ. Моделювання МСЕ дає можливість одержати досить точні рішення для вирішення практичних завдань [10]. При дослідженні МСЕ операцій кування та штампування необхідно враховувати реологію матеріалу.

Дослідження операцій кування та штампування МСЕ було проведено в роботі [11]. У роботі [11] застосований дискретний метод змінної в'язкості, що враховує реологічні властивості матеріалів і слугує альтернативою методу гідродинамічних наближень.

У цей час з'явилися потужні програмні засоби на основі МСЕ, здатні вирішувати завдання об'ємної формозміни з високою точністю [12]. У роботі [12] за допомогою МСЕ досліджувався процес деформування великогабаритних поковок. На основі цих досліджень встановлені рекомендації, які дозволили підвищити якість великих поковок.

Розвиток САЕ програм досяг такого рівня, що за допомогою скінчено-елементного (СЕ) моделювання можливе прогнозування мікроструктури металу й розмірів зерен [13].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Останнім часом для визначення формозміни в процесах обробки металів тиском одержав значне поширення МСЕ [14]. Метод визначає не тільки формозмінення заготовки, але й мікроструктуру та порушення суцільності матеріалу [15]. Отримані данні мають високу збіжність з експериментом [15]. На основі літературного огляду встановлене, що на сьогодні існуючі програми для моделювання операцій кування та штампування не дозволяють враховувати розміщення металу (релаксацію), які виникають при рекристалізації. Ці процеси істотно впливають на витрати енергії при деформуванні. Тому результати НДС металу при куванні та штампуванні є завищеними. Відсутність законів точного зв'язку деформацій та напружень призводить до неточності визначення параметрів останнього. Більше того, спроби одержати рішення вимагає значної кількості ітерацій.

Метою статті є встановлення аналітичного зв'язку компонент тензорів напружень та швидкостей деформації, який би враховував релаксацію напружень при реалізації операцій гарячого деформування, що дозволить підвищити точність визначення напружено-деформованого стану та силові параметри процесів кування великогабаритних поковок.

Виклад основного матеріалу. При вирішенні задач МСЕ доцільно встановити реальний зв'язок між швидкостями деформацій та напруженнями при різних температурних та швидкісних режимах гарячої деформації, коли у сплаві проявляються в'язкі властивості. Це співвідношення потрібно для встановлення матриці пластичності $[K]$ при СЕ моделюванні і встановлення компонентів напружень

$$\{\sigma\} = [D] \cdot \{\dot{\epsilon}\}. \quad (1)$$

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Основна відмінність незворотних (в'язких) деформацій від пластичних твердого тіла виражається в тому, що останні залежать від швидкості деформування, особливо при підвищених температурах. Сплав має в'язкі властивості, коли швидкість деформації впливає на напруження $\sigma = \sigma(\dot{\epsilon})$. В'язкість металу проявляється в тому, що після деформування внутрішні напруження змінюються із часом. Для операцій кування, коли з процесами зміцнення проходить розміцнення матеріалу, точною моделлю, яка враховує реологію, може слугувати релаксуюча модель Максвелла.

Ступінь деформації, згідно із цією моделлю, складається із пружної $\overline{\epsilon^e}$ та в'язкої $\overline{\epsilon^v}$ складових

$$\overline{\epsilon} = \overline{\epsilon^e} + \overline{\epsilon^v}. \tag{2}$$

Диференціюючи вираз (2), отримаємо:

$$\frac{d\overline{\epsilon}}{dt} = \dot{\epsilon}_{xx} = \dot{\epsilon}_{xx}^e + \dot{\epsilon}_{xx}^v; \tag{3}$$

$$\dot{\epsilon}_{xx}^e = \frac{d\overline{\epsilon^e}}{dt} = \frac{d\left(\frac{\sigma_{xx}}{E}\right)}{dt} = \frac{\left(\frac{d\sigma_{xx}}{dt}\right)}{E}; \tag{4}$$

$$\dot{\epsilon}_{xx}^v = \frac{d\overline{\epsilon^v}}{dt} = \frac{\sigma_{xx}}{\nu}. \tag{5}$$

Тоді

$$\frac{d\overline{\epsilon}}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma_{xx}}{dt} + \frac{\sigma_{xx}}{\nu}, \tag{6}$$

де ν – динамічна в'язкість, МПа·с;

E – модуль пружності Юнга, МПа.

Після врахування напружень $\sigma(0)$ у момент $t = 0$ й фіксованої деформації ($\frac{d\overline{\epsilon}}{dt} = 0$)

рівняння (6) набере вигляду $\frac{1}{E} \frac{d\sigma_{xx}}{dt} + \frac{\sigma_{xx}}{\nu} = 0$, звідки

$$\sigma = \sigma(0) \exp\left[-\frac{t}{T}\right],$$

де T – час паузи, с

$$T = \nu/E, \tag{7}$$

являє собою час, за який початкові напруження зменшуються в $e = 2,718$ раза.

Таким чином, можна припустити, що середовище Максвелла враховує реальну поведінку металу при високотемпературному пластичному деформуванні – зміцнення, а також релаксацію напружень, що забезпечує зниження опору деформуванню (у цьому випадку, по експонентній залежності) при постійній деформації, що й потрібно встановити.

Після введення позначення T (7) перепишемо рівняння (6)

$$\frac{d\sigma_{xx}}{dt} + \frac{\sigma_{xx}}{T} = E \cdot \frac{d\overline{\epsilon}}{dt}. \tag{8}$$

Відносно σ_{xx} вираз (8) при початковій умові, коли час $t = 0$ і $\sigma_{xx} = \sigma_{xx}^0$ має вигляд

$$\sigma_{xx} = e^{(-t/T)} \cdot \left\{ E \cdot \int_0^t \frac{d\bar{\varepsilon}}{dt} \cdot e^{(t/T)} \cdot dt + \sigma_{xx}^0 \right\}.$$

Якщо $\sigma_{xx}^0 = 0$ та тіло деформується зі сталою швидкістю, то напруження змінюються в часі за законом

$$\sigma_{xx} = E \cdot \bar{\varepsilon} \cdot \left(1 - e^{(-t/T)} \right).$$

У реальних процесах деформування швидкість не постійна, тому для розв'язання рівняння (8) задамо функцію ступеня деформації. Ця функція повинна бути зростаючою, тому що в процесі деформування ступінь деформації збільшується. Такою функцією можна обрати монотонно зростаючу експонентну функцію, яка відповідає реальним процесам деформування (рис. 1).

$$\bar{\varepsilon} = \frac{T}{A} \cdot \dot{\varepsilon}_{xx} \left(1 - e^{-\frac{At}{T}} \right).$$

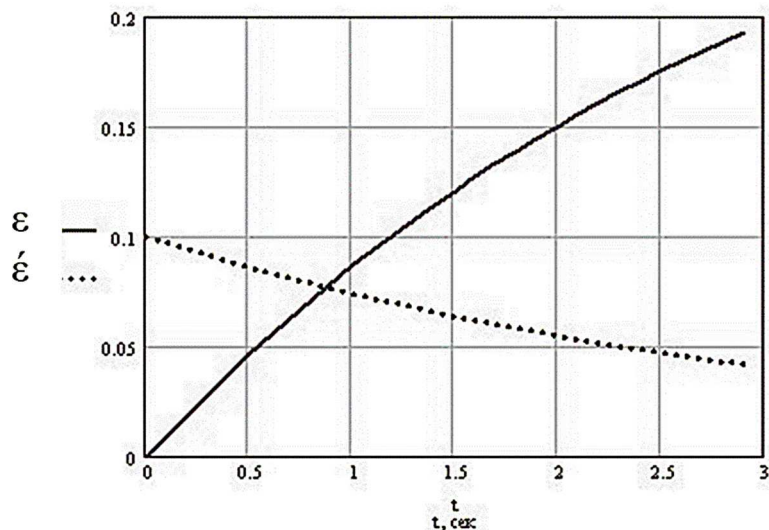


Рис. 1. Залежності ступеня ε і швидкості $\dot{\varepsilon}$ деформації від часу

Швидкість деформації в цьому випадку

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\bar{\varepsilon}}{dt} = \frac{T}{A} \cdot \dot{\varepsilon}_{xx} \left(-e^{-\frac{At}{T}} \right) \cdot \left(-\frac{A}{T} \right) = \dot{\varepsilon}_{xx} \cdot e^{-\frac{At}{T}}. \quad (9)$$

Це характерно для операцій кування та штампування, коли зі збільшенням ступеня деформації відбувається зміцнення матеріалу й збільшення розмірів осередку деформації, що призводить до підвищення зусилля деформування та зменшення лінійної швидкості деформування, а відповідно, і швидкості деформації.

Підставляючи швидкість деформації $\frac{d\bar{\varepsilon}}{dt}$ (9) у шукане рівняння (8), одержуємо таке диференціальне рівняння

$$\frac{d\sigma_{xx}}{dt} + \frac{\sigma_{xx}}{T} = E \cdot \dot{\varepsilon}_{xx} \cdot e^{-\frac{At}{T}}. \quad (10)$$

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Отримане рівняння вирішувалося методом варіації постійної, для цього спочатку розглядалося однорідне диференціальне рівняння

$$\frac{d\sigma_x}{dt} + \frac{\sigma_x}{T} = 0; \quad \frac{d\sigma_x}{\sigma_x} = -\int \frac{dt}{T}; \quad \ln \frac{\sigma_x}{C} = -\int \frac{dt}{T},$$

звідси $\sigma_x(t) = C e^{-\int \frac{dt}{T}}$.

Для розв'язку неоднорідного рівняння (8) застосовуємо метод варіації постійної, замінивши C невідомою функцією $\varphi(t)$, тоді

$$\sigma_x(t) = \varphi(t) e^{-\int \frac{dt}{T}}. \tag{11}$$

Диференціюємо (11) і одержуємо

$$\frac{d\sigma_x}{dt} = \frac{d\varphi}{dt} \cdot e^{-\int \frac{dt}{T}} - \frac{\varphi(t)}{T} \cdot e^{-\int \frac{dt}{T}}. \tag{12}$$

Після підстановки (12) у рівняння (8)

$$\frac{d\varphi}{dt} \cdot e^{-\int \frac{dt}{T}} - \frac{\varphi(t)}{T} \cdot e^{-\int \frac{dt}{T}} + \frac{\varphi(t)}{T} \cdot e^{-\int \frac{dt}{T}} = E \cdot \frac{d\varepsilon}{dt}.$$

Отже, $\frac{d\varphi}{dt} = E \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} \cdot e^{\int \frac{dt}{T}}$.

Інтегруючи, встановлюємо

$$\varphi(t) = \int E \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} \cdot e^{\int \frac{dt}{T}} dt + C_1. \tag{13}$$

Після підстановки (13) в (11) одержуємо

$$\sigma_x(t) = e^{-\int_{t_0}^t \frac{dt}{T}} \left[C_1 + \int_{t_0}^t E \frac{d\varepsilon}{dt} \cdot e^{\int_{t_0}^t \frac{dt}{T}} dt \right],$$

де t_0 і t – межі інтегрування: t_0 – початок паузи, а t – кінець паузи.

Приймаючи, що $\bar{\varepsilon} = \frac{T}{A} \cdot \varepsilon_{xx} (1 - e^{-\frac{At}{T}})$ й $\sigma_{xx}^0 = 0$, одержуємо $\frac{d\varepsilon}{dt} = \dot{\varepsilon}_{xx} \cdot e^{\frac{At}{T}}$.

Якщо $t_0 = 0$, тоді $\sigma_x(t) = e^{-\frac{t}{T}} \left[C_1 + \int_0^t E \dot{\varepsilon}_{xx} e^{\frac{At}{T}} \cdot e^{\frac{t}{T}} dt \right]$.

Після відповідних перетворень і використання початкової умови $\sigma_{xx}^0 = 0$ одержуємо

$$C = -E \cdot \dot{\varepsilon}_{xx} \cdot \frac{T}{1-A}.$$

Отже, $\sigma_x(t) = e^{-\frac{t}{T}} \left[-E \cdot \dot{\varepsilon}_{xx} \cdot \frac{T}{1-A} + \frac{T}{1-A} E \cdot \dot{\varepsilon}_{xx} \cdot e^{\frac{t}{T}(1-A)} \right]$

або $\sigma_x(t) = E \cdot \dot{\varepsilon}_{xx} \cdot \frac{T}{1-A} \cdot \left[e^{\frac{tA}{T}} - e^{\frac{t}{T}} \right]$.

При $A = 1$ слід розкрити невизначеність виду $\begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$ й прийти до частного випадку рішення. Розглянемо окремо випадок при $A \rightarrow 1$

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= \lim_{A \rightarrow 1} \left[E \cdot \dot{\varepsilon}_{xx} \cdot \frac{T}{1-A} \left(e^{\frac{tA}{T}} - e^{\frac{t}{T}} \right) \right] = E \cdot \dot{\varepsilon}_{xx} \cdot T \cdot \lim_{A \rightarrow 1} \frac{e^{\frac{tA}{T}} - e^{\frac{t}{T}}}{1-A} = \left\{ \frac{0}{0} \right\} = \\ &= E \cdot \dot{\varepsilon}_{xx} \cdot T \cdot \lim_{A \rightarrow 1} \frac{e^{\frac{t}{T}} \left(e^{\frac{t}{T}(A-1)} - 1 \right)}{1-A} = \left[e^{\frac{t}{T}(A-1)} - 1 \infty - \frac{t}{T}(A-1) \text{ при } A \rightarrow 1 \right] = \\ &= E \cdot \dot{\varepsilon}_{xx} \cdot T \cdot \lim_{A \rightarrow 1} \frac{e^{\frac{t}{T}} \left(-\frac{t}{T}(A-1) \right)}{1-A} = E \cdot \dot{\varepsilon}_{xx} \cdot T \cdot e^{\frac{t}{T}} \cdot \frac{t}{T} = E \cdot \dot{\varepsilon}_{xx} \cdot t \cdot e^{\frac{t}{T}}.\end{aligned}$$

Отже, при $A = 1$ одержуємо

$$\sigma_{xx} = E \cdot \dot{\varepsilon}_{xx} \cdot t \cdot e^{\frac{t}{T}}. \quad (14)$$

З урахуванням вищевикладеного, при $A = 1$ можна спростити функції опису ступеня й швидкості деформації (9) до виду:

$$\bar{\varepsilon} = T \cdot \dot{\varepsilon}_{xx} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T}}), \quad \frac{d\bar{\varepsilon}}{dt} = \dot{\varepsilon}_{xx} \cdot e^{-\frac{t}{T}}.$$

Проведена математична процедура при $A \rightarrow 1$ не змінила вид функцій описів ступенів і швидкості деформації, вони аналогічні тим, що представлені на рис. 1. Аналіз встановленої моделі (14) дозволив визначити такі важливі результати:

– на максимум напружень впливає модуля Юнга при певних температурах деформування та швидкості деформування;

– пік функції (14) відповідає часу, який дорівнює $T = \nu/E$, тобто це момент, коли настає пауза (розвантаження металу), що не суперечить механіці процесу деформування. Цей час T можна розрахувати при відомих ступеню та швидкості деформації або він є вихідними даними для вирішення завдання.

Крім того, ця модель дозволяє визначити в'язкість ν матеріалу (що часто буває необхідно в розрахунках іншими методами, коли метал у гарячому стані вважають в'язким середовищем) зі співвідношення (7) через добуток $T \cdot E$ або шляхом підбору, коли відомий час деформування, швидкість і ступень деформації, змінюючи модуль Юнга до збігу значень функції (14) з експериментом. Таким чином, врахування в'язких властивостей тіла зводиться до встановлення точного значення модуля Юнга залежно від рівня температури.

Розв'язок цього завдання не викликає труднощів при відомій діаграмі розтягу матеріалу або за наявності кривої зміцнення для різних температур. Також для визначення модуля Юнга можна скористатися довідковою літературою. Модуль Юнга при підвищенні температури зменшується за експонентною залежністю.

Отримана модель не виключає визначення модуля Юнга методом підбору до збігу отриманої залежності з кривою зміцнення-розміцнення. Зниження рівня напружень у матеріалі після деформації (під час паузи), згідно з отриманою моделлю, відбувається за експонентним законом, що не суперечить реальній поведінці матеріалу після зняття навантаження. При цьому не потрібне задання додаткових коефіцієнтів.

При збільшенні швидкості деформації релаксація напружень не встигає в часі за швидкістю зміцнення металу. Для врахування величини релаксації на опір деформування залежності зміцнення та розміцнення приводять від часу. Графічно закономірність (14) наведена на рис. 2 у вигляді функції, яка має зміцнення й релаксацію напружень (розміцнення) при знятті навантаження. На рис. 2 наведено експериментальні дані кривих течій (криві 1 і 3) для різних сталей при $\dot{\varepsilon} = 7 \times 10^{-3} \text{ c}^{-1}$ та температурах нагрівання $900 \text{ }^\circ\text{C}$ і $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, функція (15) показана кривими 2 і 4.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Різниця в поведінці функції при розміцненні (аналітична залежність асимптотично наближається до стану, коли напруження дорівнюють нулю, а експериментальні дані асимптотично наближаються до певного напруження, яка є межею текучості матеріалу) викликана тим, що при експериментальному дослідженні зразок залишався під навантаженням. Це обумовлене методикою дослідження й конструкцією кулачкового пластометра. У результаті напруження не можуть знизитися до нуля, тому що на зразок продовжує діяти навантаження після припинення процесу деформування для можливості встановлення зміни релаксації в матеріалі після припинення деформації. Різниця експериментальних і розрахункових значень напружень на ділянці релаксації становить величину межі текучості матеріалу при цій температурі. При врахуванні в отриманій моделі впливу навантаження на зразок (як при експериментальному дослідженні) за допомогою збільшення напружень на величину межі текучості матеріалу (σ_T) на ділянці релаксації напружень, то отримаємо збіг залежностей з відхиленням 9...14 % (рис. 2).

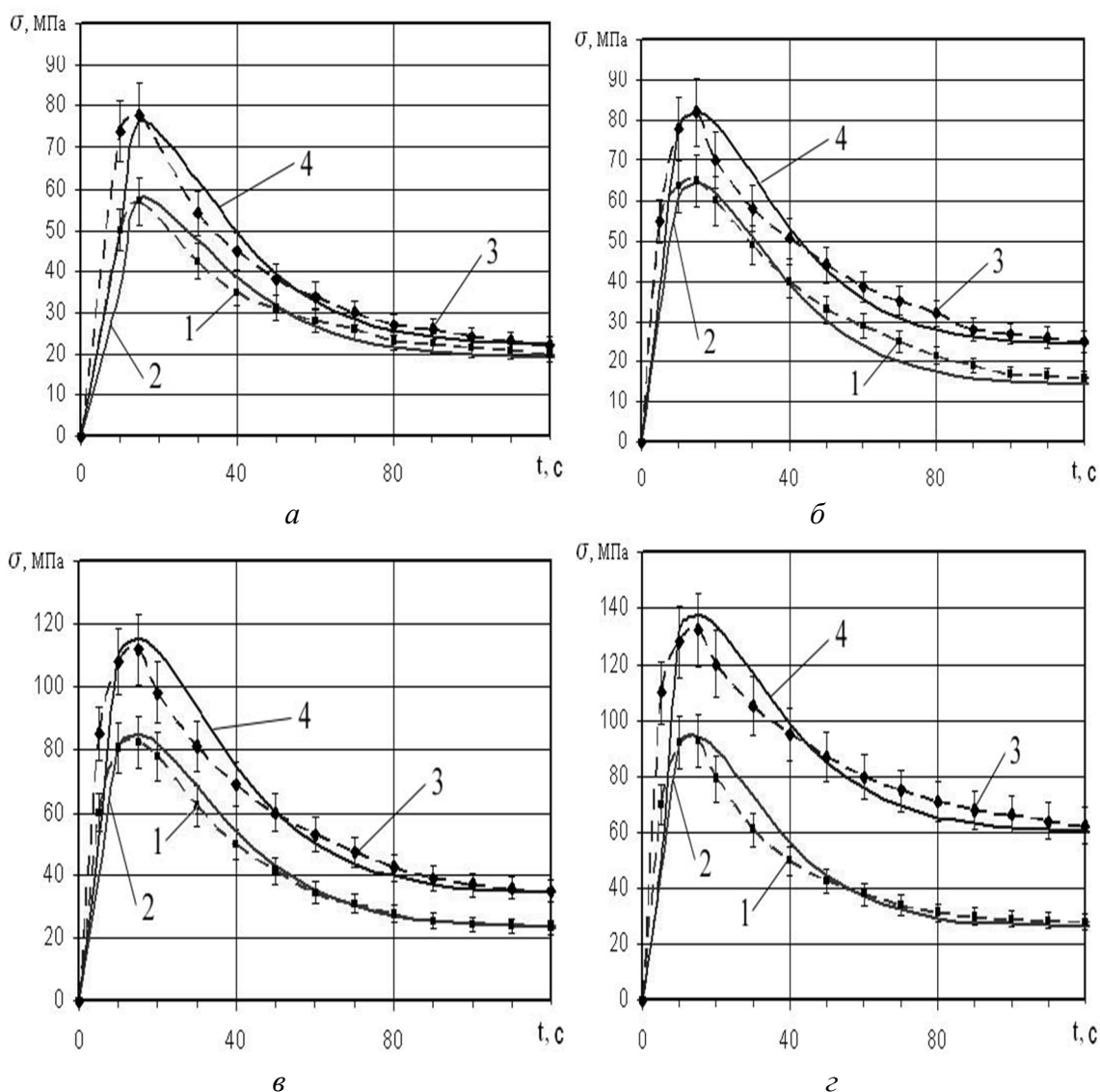


Рис. 2. Порівняння експериментальних даних зміцнення – розміцнення із залежностями (14) для сталей: 40Х (а), 9ХФ (б), ХВГ (в) та 10Х16Н8 (з) після урахування впливу навантаження на матеріал величиною σ_T :

1 – $T = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ (експеримент); 2 – $T = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ (розрахунки);
 3 – $T = 900 \text{ }^\circ\text{C}$ (експеримент); 4 – $T = 900 \text{ }^\circ\text{C}$ (розрахунки)

Таким чином, встановлена причина розбіжності даних експерименту та теоретичних значень зміцнення й розміцнення, що дає підставу вважати розроблену модель достовірною, тому що вона на 90...93 % описує реологію металу при гарячому деформуванні.

Отримана модель зв'язку компонент швидкостей деформацій та напружень при гарячому деформуванні, що враховує механізм релаксації напружень у металі (сплав) після деформації, відкриває широкі перспективи для її застосування в СЕ моделюванні.

Висновки відповідно до статті. На основі розробленої математичної моделі було встановлено, що максимум напружень визначається модулем Юнга для певних температур та матеріалу і швидкості деформації при звісному часі деформування. Пік функції відповідає часу $T = v/E$, коли настає пауза. Експериментально встановлено, що розроблена модель на 90...93 % описує реологію металу при гарячому деформуванні. Установлений зв'язок компонент швидкостей деформацій та напружень дозволив одержувати прямий чисельний розв'язок завдань пластичного деформування без ітераційних процедур МСЕ з урахуванням реальних властивостей металу при деформації, що суттєво зменшує кількість ітерацій та час розрахунків.

Список використаних джерел

1. Improving the quality of forgings based on upsetting the workpieces with concave facets / O. E. Markov, V. N. Zlygoriev, O.V. Gerasimenko, N.S. Hrudkina, S.A. Shevtsov. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 5(1-95). P. 16-24. DOI: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.142674>.
2. Buckingham R. C., Argyrakis C., Hardy M. C., Biroasca S. The effect of strain distribution on microstructural developments during forging in a newly developed nickel base super alloy. *Materials Science & Engineering*. 2016. №A654. P. 317-328. DOI: <http://doi:10.1016/j.msea.2015.12.042>.
3. The effect of forging temperature on microstructure and mechanical properties of in situ TiC/Ti composites / F. Ma, W. Lu, J. Qin, D. Zhang, B. Ji. *Mater. and Des.* 2007. № 28. P. 1339-1342. DOI: <http://doi:10.1016/j.matdes.2006.02.004>.
4. Ma Q., Lin Z., Yu Z. Prediction of deformation behavior and microstructure evolution in heavy forging by FEM. *International Journal Advanced Manufactory Technology*. 2009. № 40 (3-4). P. 253-260. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-007-1337-9>.
5. Pantalé, O., Gueye, B. Influence of the constitutive flow law in FEM simulation of the radial forging process. *Journal of Engineering*. 2013. Article ID 231847, P. 8. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/231847>.
6. Yunjian W., Xianghuai D., Qiong Y. Upper bound analysis of axial metal flow inhomogeneity in radial forging process. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2015. № 93. P. 102–110. DOI: <http://doi:10.1016/j.ijmecsci.2015.01.012>.
7. Development of alternative technology of dual forming of profiled workpiece obtained by buckling / V. Kukhar, V. Burko, A. Prysiaznyi, E. Balalayeva, M. Nahnibeda. *East-European Journal of Enterprise Technology*. 2016. № 3/7(81). P. 53–61. DOI: <https://doi:10.15587/1729-4061.2016.72063>.
8. Dobrzański L. A., Grajcar A., Borek W. Influence of hot-working conditions on a structure of high-manganese austenitic steels. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2008. № 29/2. P. 139–142.
9. Weides, G., Blaes, N., Bokelmann, D. Optimisation of the forging process of profiled discs for low pressure turbine rotors by FEM simulation. *17 International Forgemasters Meeting*, Santander, Spain, (3-7 Nov. 2008).
10. Erman E., Medei N. M., Roesch A. R., Shah, D. C. Physical modeling of the upsetting process in open-die press forging. *J. Mech. Working Tech.* 1989. № 19. P. 195–210. DOI: [http://doi:10.1016/0378-3804\(89\)90004-1](http://doi:10.1016/0378-3804(89)90004-1).
11. Markov, O.E. et al. Development of a new process for forging plates using intensive plastic deformation. *International Journal Advanced Manufactory Technology*. 2016. №83(9-12). P. 2159–2174. DOI: <http://doi.org/10.1007/s00170-015-8217-5>.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

12. Kitamura K., Terano M. Determination of local properties of plastic anisotropy in thick plate by small-cube compression test for precise simulation of plate forging. *CIRP Ann - Manuf Techn.* 2014. № 63 (1). P. 293–296. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.038>.

13. Markov O. E. Forging of Large Pieces by Tapered Faces. *Steel in Translation*. 2012. № 42 (12). P. 808–810. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0967091212120054>.

14. Mitani Y., Mendoza V., Osakada K. Analysis of rotor shaft forging by rigid-plastic FEM. *Journal Material Processes Technology*. 1991. № 27. P. 137–149. DOI: [http://doi:10.1016/0924-0136\(91\)90049-K](http://doi:10.1016/0924-0136(91)90049-K).

15. Markov, O.E. et al. A new process for forging shafts with convex dies. Research into the stressed state. *International Journal Advanced Manufactory Technology*. 2017. № 90. P. 801–818. DOI: <http://doi.org/10.1007/s00170-016-9378-6>.

References

1. Markov, O., Zlygoriev, V., Gerasimenko, O., Hrudkina, N., Shevtsov, S. (2018). Improving the quality of forgings based on upsetting the workpieces with concave facets. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (1-95), 16–24. DOI: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.142674>.

2. Buckingham, R.C., Argyrakis, C., Hardy, M.C., Biroasca, S. (2016). The effect of strain distribution on microstructural developments during forging in a newly developed nickel base super alloy. *Materials Science & Engineering*, A654, 317–328. DOI: <http://doi:10.1016/j.msea.2015.12.042>.

3. Ma, F., Lu, W., Qin, J., Zhang, D., Ji, B. (2007). The effect of forging temperature on microstructure and mechanical properties of in situ TiC/Ti composites. *Mater. and Des.*, 28, 1339–1342. DOI: <http://doi:10.1016/j.matdes.2006.02.004>.

4. Ma, Q., Lin, Z., Yu, Z. (2009). Prediction of deformation behavior and microstructure evolution in heavy forging by FEM. *International Journal Advanced Manufactory Technology*, 40 (3-4), 253–260. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-007-1337-9>.

5. Pantalé, O., Gueye, B. (2013). Influence of the constitutive flow law in FEM simulation of the radial forging process. *Journal of Engineering*, Article ID 231847, 8. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/231847>.

6. Yunjian, W., Xianghuai, D., Qiong, Y. (2015). Upper bound analysis of axial metal flow inhomogeneity in radial forging process. *International Journal of Mechanical Sciences*, 93, 102–110. DOI: <http://doi:10.1016/j.ijmecsci.2015.01.012>.

7. Kukhar, V., Burko, V., Prysiaznyi, A., Balalayeva, E., Nahnibeda M. (2016). Development of alternative technology of dual forming of profiled workpiece obtained by buckling. *East-European Journal of Enterprise Technology*, 3/7 (81), 53–61. DOI: <https://doi:10.15587/1729-4061.2016.72063>.

8. Dobrzański, L.A., Grajcar, A., Borek, W. (2008). Influence of hot-working conditions on a structure of high-manganese austenitic steels. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 29/2, 139–142.

9. Weides, G., Blaes, N., Bokelmann, D. (2008). Optimisation of the forging process of profiled discs for low pressure turbine rotors by FEM simulation. *17 International Forgemasters Meeting*, Santander, Spain, (3-7 Nov. 2008).

10. Erman, E., Medei, N. M., Roesch, A. R., Shah, D. C. (1989). Physical modeling of the upsetting process in open-die press forging. *J. Mech. Working Tech.*, 19, 195–210. DOI: [http://doi:10.1016/0378-3804\(89\)90004-1](http://doi:10.1016/0378-3804(89)90004-1).

11. Markov, O.E. et al. (2016). Development of a new process for forging plates using intensive plastic deformation. *International Journal Advanced Manufactory Technology*, 83 (9-12), 2159–2174. DOI: <http://doi.org/10.1007/s00170-015-8217-5>.

12. Kitamura, K., Terano M. (2014). Determination of local properties of plastic anisotropy in thick plate by small-cube compression test for precise simulation of plate forging. *CIRP Ann - Manuf Techn.*, 63(1), 293–296. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.038>.

13. Markov, O. E. (2012). Forging of Large Pieces by Tapered Faces. *Steel in Translation*, 42 (12), 808–810. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0967091212120054>.

14. Mitani, Y., Mendoza, V., Osakada K. (1991). Analysis of rotor shaft forging by rigid-plastic FEM. *Journal Material Processes Technology*, 27, 137–149. DOI: [http://doi:10.1016/0924-0136\(91\)90049-K](http://doi:10.1016/0924-0136(91)90049-K).

15. Markov, O. E. et al. (2017). A new process for forging shafts with convex dies. Research into the stressed state. *International Journal Advanced Manufactory Technology*, 90, 801–818. DOI: <http://doi.org/10.1007/s00170-016-9378-6>.

UDC 621.321

Oleksiy Gerasimenko, Oleg Markov

DEVELOPMENT OF SCIENTIFIC BASES OF COMPUTER SIMULATION OF HOT DEFORMATION PROCESSES

Urgency of the research. Technological processes of forging large-sized workpieces with responsible destination require precise determination of technological modes of the deformation process. This is necessary to ensure high quality and optimal cost in the manufacture of products weighing from 20 to 200 tons. The optimal technological forging regimes can be established on the basis of the data of the stress-strain state of the workpiece during forging.

Target setting. The forging of large forgings is a small-scale and single type of expensive production with low liquidity; therefore, these processes require preliminary finite-element modeling of the stress-strain state and power parameters of forging. Modeling should allow to accurately establish the stress-strain state of the workpiece in the forging process.

Actual scientific researches and issues analysis. Based on the analysis of publications in recent years, it was found that the main attention in modeling the processes of forging large forgings using the finite element method was given to changing the shape of the workpiece when using new methods of forging and deforming tools.

Uninvestigated parts of general matters defining. Existing software packages for modeling hot deformation processes based on the finite element method do not allow to take into account stress relaxation processes that occur at recrystallization temperatures. This is due to the lack of an analytical link between the components of the strain rate and stress tensors, which would take this relaxation into account. Accounting for stress relaxation will allow you to accurately set the stress and strain state of the workpiece, and, accordingly, the energy-power parameters of the forging process.

The research objective of this article is to establish an analytical relationship between the components of the stress and strain rate tensors, which would take into account stress relaxation during hot deformation operations, which will improve the accuracy of determining the stress-strain state and the power parameters of the forging processes of large forgings.

The statement of basic materials. The paper shows that when modeling the processes of forging and stamping, it is necessary to take into account not only the processes of material hardening, but also the stress relaxation that occurs during hot working. On the basis of the Maxwell viscoelastic relaxing model, the relationship between the components of the strain rate and stress tensor was established. The developed model allows to take into account the relaxation of metal stresses during hot deformation. The resulting mathematical model was tested by experiment on different steels at different temperatures of deformation.

Conclusions. It was established experimentally that the model developed by 90...93% describes the rheology of the metal during hot deformation. The relationship between the components of the strain rates and stresses was established, which allowed us to obtain a direct numerical solution of plastic deformation problems without iterative procedures of the FEM taking into account the real properties of the metal during deformation, which significantly reduces the number of iterations and calculations.

Keywords: hot deformation; hardening; softening; stress relaxation; FEM; hardening curve.

Fig.: 2. References: 15.

Герасименко Олексій Васильович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютеризованого дизайну і моделювання процесів і машин, Донбаська державна машинобудівна академія (вул. Академічна, 72, м. Краматорськ, 84313, Україна).

Gerasimenko Oleksiy – PhD in Technical science, Associate Professor, Associate Professor of Department of Computerized Design and Modeling of Processes and Machines, Donbass State Engineering Academy (72 Akademichna Str., 84313 Kramatorsk, Ukraine).

E-mail: mto@dgma.donetsk.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9895-2023>

SCOPUS Author ID: 57205503974

Марков Олег Євгенійович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютеризованого дизайну і моделювання процесів і машин, Донбаська державна машинобудівна академія (вул. Академічна, 72, м. Краматорськ, 84313, Україна).

Markov Oleg – Doctor in Technical science, Professor, Head of Department of Computerized Design and Modeling of Processes and Machines, Donbass State Engineering Academy (72 Akademichna Str., 84313 Kramatorsk, Ukraine).

E-mail: oleg.markov.ond@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9377-9866>

SCOPUS Author ID: 55648046800

Віталій Кальченко, Володимир Кальченко, Ярослав Кужельний, Володимир Морочко

ВИЗНАЧЕННЯ СИЛ РІЗАННЯ ПРИ ЧИСТОВОМУ ШЛІФУВАННІ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ПОВЕРХНІ ВАЛА

Актуальність теми дослідження. Під час процесу шліфування орієнтованим кругом на інструмент діють сили різання від абразивних зерен. Визначення сил різання в зоні шліфування дає можливість вибирати оптимальні режими обробки.

Постановка проблеми. На кінцевий результат обробки циліндричної поверхні вала впливають різноманітні фактори, які, у свою чергу, залежать від абразивного круга. Орієнтація абразивних зерен в інструменті впливає на величину та напрямок сил різання під час обробки. Під час круглого шліфування розподіл зрізуваного матеріалу вздовж кромки круга та його знос відбуваються не раціонально.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Існують способи глибокого шліфування зі схрещеними осями абразивного круга та деталі, в яких кут орієнтації різального інструменту вибирається залежно від найбільшої продуктивності процесу шліфування. Для визначення сил різання застосовують два методи: емпіричний та розрахунково-експериментальний. Створено метод однопрохідного чистового шліфування гладких циліндричних поверхонь, який забезпечує високу точність обробки.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Відсутність дослідження сил різання, що виникають у процесі чистового шліфування циліндричної поверхні вала.

Постановка завдання. Розробка загальної модульної 3D моделі поверхонь шліфувального круга та деталі, процесу формоутворення та заняття припуску, при шліфуванні циліндричної поверхні вала. Створення 3D моделі процесу різання деталі одиничним абразивним зерном при чистовому шліфуванні. Визначення розподілу сил різання від різальних та деформуючих кромок у відповідних площинах абразивного зерна.

Виклад основного матеріалу. Для способу чистового шліфування циліндричної поверхні вала орієнтованим шліфувальним кругом розроблені математичні 3D моделі поверхні шліфувального круга та деталі. Створені моделі зняття припуску та формоутворення. Створено 3D модель процесу різання деталі одиничним абразивним зерном. Визначено розподіл сил різання від різальних та деформуючих кромок у відповідних площинах абразивного зерна.

Висновки відповідно до статті. Створені модульні 3D моделі поверхонь шліфувального круга та деталі, зняття припуску та формоутворення при чистовому шліфуванні циліндричної поверхні вала. Розроблена 3D модель процесу різання одиничним абразивним зерном та визначено розподіл сил різання від різальних та деформуючих кромок у відповідних площинах абразивного зерна.

Ключові слова: абразивне зерно; сили різання; 3D модель різання; орієнтований інструмент; процес шліфування.

Рис.: 13. Бібл.: 10.

Актуальність теми дослідження. У різних галузях машинобудівної промисловості розповсюджена велика кількість деталей із циліндричною поверхнею. Для отримання необхідних вимог щодо якості потрібно застосовувати відповідні фінішні операції.

Одним із найпоширеніших методів фінішної обробки деталей є шліфування. Саме оптимальний підбір оброблювального інструменту та режиму шліфування впливають на фізико-механічний стан поверхневого шару деталі, шорсткість та точність геометричних розмірів.

Визначення сил різання, які виникають під час процесу шліфування, дають можливість підвищити продуктивність процесу.

Постановка проблеми. Процес шліфування – це складний теплонапружений нестационарний процес. Такі фактори, як розміщення абразивних зерен у шліфувальному крузі, кут нахилу даних зерен відносно оброблювальної деталі, глибина врізання, радіус заокруглення вершини різальної кромки, кут орієнтації інструмента відносно деталі ускладнюють дослідження цього процесу. Відповідно величина й напрямок сил різання буде залежати від вищезгаданих факторів.

Під час круглого шліфування циліндричних деталей більша частина припуску знімається периферією інструмента, що призводить до температурного навантаження та нераціонального розподілу зрізуваного матеріалу вздовж кромки шліфувального круга. Це, у свою чергу, призводить до зниження точності деталі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для визначення сил різання застосовують два методи: емпіричний та розрахунково-експериментальний [1; 2; 3]. Перший метод застосовується тільки в умовах шліфування наближених до експериментальних. Недолік другого методу полягає в необхідності точного вимірювання певних параметрів, що не завжди можливо реалізувати. Також ці методи не враховують впливу стану

робочої поверхні інструмента, який змінюється в процесі обробки, вплив орієнтації абразивного зерна відносно деталі та ін.

У роботі [1] наведена велика кількість експериментальних досліджень процесу шліфування. Проте не досліджено вплив різальних кромки під час деформацій деталі. У роботі [4] розглянуто методику визначення складових сили різання при глибинному шліфуванні поверхонь обертання орієнтованим ельборовим кругом, з урахуванням впливу різальних та деформуєчих зерен, а також жорсткість оброблюваної системи. Розглянуто метод однопрохідного доводочного шліфування гладких циліндричних поверхонь [5]. Цей метод забезпечує високу точність обробки.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Відсутність дослідження сил різання та впливу деформації деталі різальними кромками абразивного зерна при чистовому шліфуванні циліндричної поверхні вала.

Мета статті. Метою цієї статті є розробка методики та розрахунок сил різання при шліфуванні циліндричної поверхні вала орієнтованим інструментом з урахуванням різальних кромки абразивного зерна, які деформують деталь.

Виклад основного матеріалу. На точність поверхневого шару деталі найбільший вплив має операція шліфування.

Перед тим, як почнеться процес різання абразивними зернами, у місці контакту з деталлю буде відбуватись ковзання різальної кромки. Таке ковзання призводить до пластичного деформування деталі. Також відповідно до глибини врізання інші різальні кромки будуть пружньо або пластично деформувати деталь без зняття шару металу. Для визначення закінчення процесу деформації та початку процесу різання застосовується критерій, який є відношенням глибини врізання до радіуса заокруглення вершини різальної кромки абразивного зерна (a_z / ρ).

Чистова обробка циліндричної поверхні вала 2 зображена на рис. 1. Діаметр поверхні прийнято 40 мм, як інструмент 1 прийнято абразивний шліфувальний круг I-150×20×32 25А 25 СТ1 7К. Швидкість інструмента 30 м/с, деталі 30 м/хв, глибина різання $t = 0,1$ мм.

Згідно з описаною методикою [5], для максимального завантаження різальної поверхні інструмента 1, та розподілу величини шару, який знімається вздовж його периферії, повернемо абразивний круг навколо осі Y_u , яка перпендикулярна до осей обертання інструменту та деталі 2, і яка перебуває на відстані $C = 6$ мм від торця абразивного круга на кут $\beta = 0,333$ рад.

Модульна 3D модель поверхні абразивного круга 1, для розглянутої схеми обробки (рис. 1) визначається рівнянням:

$$Shk(x, \theta_u) = C^u_{x, \theta_u} = M1(x) \cdot M4(\theta_u) \cdot M2(R_u) \cdot e4, \quad (1)$$

де $C^u_{x, \theta}$ – циліндричний модуль інструментальної поверхні; $M1...M6$ – матриці переміщення та повороту відносно координатних осей X, Y, Z; $e4$ – одиничний радіус вектор початку координат; $R_u = 75$ мм – радіус абразивного круга; $x = 0..B$ – лінійна координата на периферії, змінюється від 0 до значення висоти шліфувального круга $B = 20$ мм; $\theta_i = 0...360^\circ$ – кутова координата профілю шліфувального круга.

Модульна 3D модель циліндричної поверхні вала визначається перенесенням інструментальної поверхні в систему координат деталі, за рахунок введення матриці переносу $M^{nep} = M2(-y_c)$ та модулів формоутворення $C^{\phi}_{\theta_d} = M1(\theta_d \cdot p_z) \cdot M4(\theta_d)$ і орієнтації $C^{\beta}_0 = M5(-\beta) \cdot M1(-B + C)$. Тому математична 3D модель поверхні деталі описується виразом:

$$\begin{aligned}
 Det(x, \theta_u, \theta_d) &= C^{\phi_{\theta_d}} \cdot M^{nep} \cdot C^{\circ_{\beta}} \cdot C^{u_{x, \theta_u}} \cdot e4 = M1(\theta_d \cdot p_z) \cdot M4(\theta_d) \cdot M2(-y_c) \times \\
 &\times M5(-\beta) \cdot M1(-B + C) \cdot M1(x) \cdot M4(\theta_u) \cdot M2(R_u) \cdot e4,
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

де $y_c = R_u + R_d$ – відстань між осями інструмента та деталі; C – довжина калібрувальної частини круга; θ_d – кутовий параметр деталі (кут повороту навколо власної осі);

$p_z = \frac{S}{2 \cdot \pi}$ – крок гвинтової лінії подачі; $S = 6 \text{ мм}$ – осьова подача деталі.

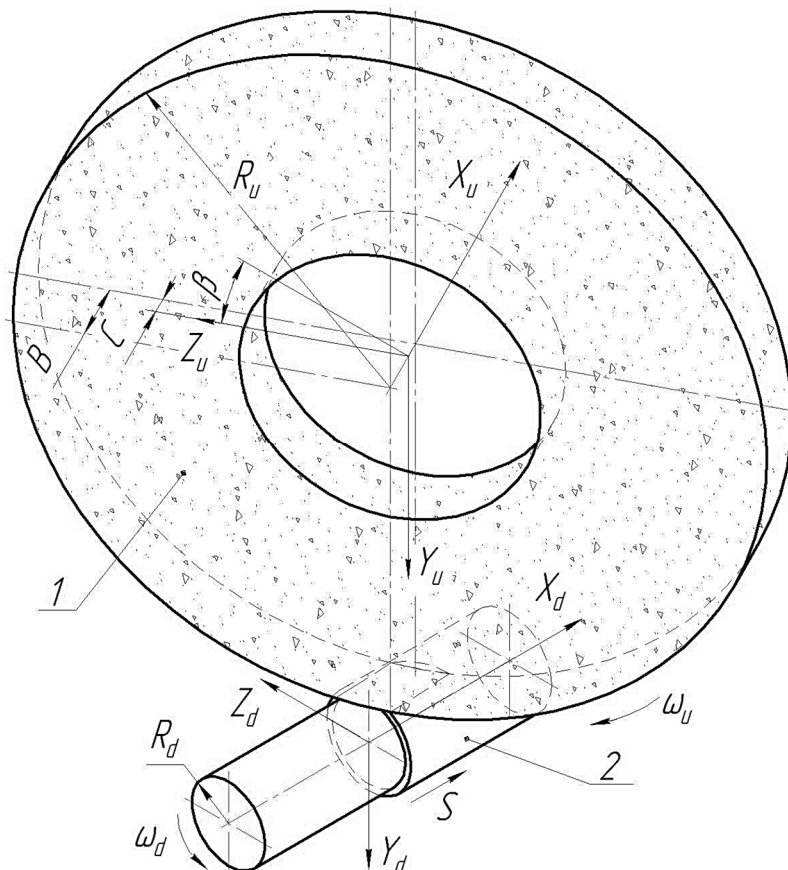


Рис. 1. Схема однопрохідного чистового шліфування циліндричної поверхні вала

Для визначення профілю деталі розглянемо переріз вала та шліфувального круга у площині, яка перпендикулярна осям обертання інструмента та деталі та проходить через точку А (рис. 2). Відносний рух круга і заготовки зводиться до його обертання навколо осі деталі.

Згідно з [6] у будь-якій точці M профілю шліфувального круга швидкість відносного руху \bar{V} буде перпендикулярною до прямої O_1M , що з'єднує вісь деталі з досліджуваною точкою. Нормаль \bar{N} до профілю шліфувального круга буде проходити по радіусу, що з'єднує центр шліфувального круга O_2 з точкою M . У довільній точці M профілю круга, нормаль \bar{N} не перпендикулярна швидкості \bar{V} .

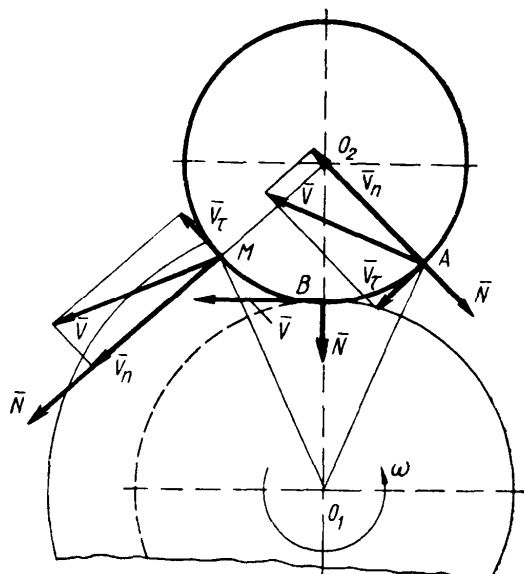


Рис. 2. Схема шліфування вала абразивним кругом

Розкладемо швидкість \bar{v} на складові в напрямку нормалі та дотичній до профілю круга:

$$\bar{v} = \bar{v}_n + \bar{v}_t. \quad (3)$$

У результаті руху зі швидкістю \bar{v}_n , точка M профілю круга буде врізатися в заготовку. У точці A профілю круга нормаль \bar{N} не буде перпендикулярною до \bar{v} .

У точці B профілю круга нормаль \bar{N} буде перпендикулярна до швидкості \bar{v} відносно руху. Також ця точка буде точкою контакту профілю круга і профілю поверхні деталі.

Умова контакту профілів шліфувального круга та деталі, тобто умова перпендикулярності векторів \bar{N} і \bar{v} :

$$\bar{N} \cdot \bar{v} = 0. \quad (4)$$

Ця умова дає можливість визначити точки контакту з'єднувальних профілів у будь-який момент часу. Сукупність точок контакту в системі координат, яка пов'язана із заготовкою, буде профілем деталі.

Визначаємо закон розподілу величини нормальної швидкості різання V_n вздовж профілю деталі. При цьому вектор \bar{N} до поверхні шліфувального круга визначається як векторний добуток дотичних у цій точці:

$$N(x, \theta_u, \theta_d) = \frac{\partial \det(x, \theta_u, \theta_d)}{\partial x} \times \frac{\partial \det(x, \theta_u, \theta_d)}{\partial \theta_u}. \quad (5)$$

Одиничний вектор нормалі:

$$n(x, \theta_u, \theta_d) = \frac{N(x, \theta_u, \theta_d)}{\sqrt{N(x, \theta_u, \theta_d)_1^2 + N(x, \theta_u, \theta_d)_2^2 + N(x, \theta_u, \theta_d)_3^2}}. \quad (6)$$

Вектор швидкості визначається як похідна по куту повороту деталі:

$$V(x, \theta_u, \theta_d) = \frac{\partial \det(x, \theta_u, \theta_d)}{\partial \theta_d}. \quad (7)$$

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Щоб визначити величини добутку $n \cdot V$, у кожній точці осьового перерізу на периферії шліфувального круга, використовуємо розрахунковий блок:

$$\begin{aligned}
 & \theta \leftarrow 0 \\
 & \text{for } j \in 0..N \\
 & \quad x \leftarrow x_{\min} + \frac{x_{\max}}{N} \cdot j \\
 & \quad Nv \leftarrow \frac{\partial \bar{r}(x, \theta_u, 0)}{\partial x} \times \frac{\partial \bar{r}(x, \theta_u, 0)}{\partial \theta_u} \cdot \frac{\partial \bar{r}(x, \theta_u, 0)}{\partial \theta_d} \cdot \omega_d \\
 & \quad M^{(j+1)} \leftarrow \begin{pmatrix} x \\ Nv \end{pmatrix} \\
 & M^T,
 \end{aligned} \tag{8}$$

де $x_{\min} = 0$, $x_{\max} = B$ – мінімальна та максимальна координати точок на профілю шліфувального круга; $\omega_d = 1000 \text{ об} / \text{хс}^{-1}$ – частота обертання деталі; N – кількість точок на периферії інструмента, які розглядають для визначення нормальної швидкості різання; M – матриця координат точок на периферії шліфувального круга та відповідних їм значень нормальної швидкості.

Згідно з розрахунками, будуємо графік зміни проекції швидкості різання на напрямок нормалі (рис. 3).

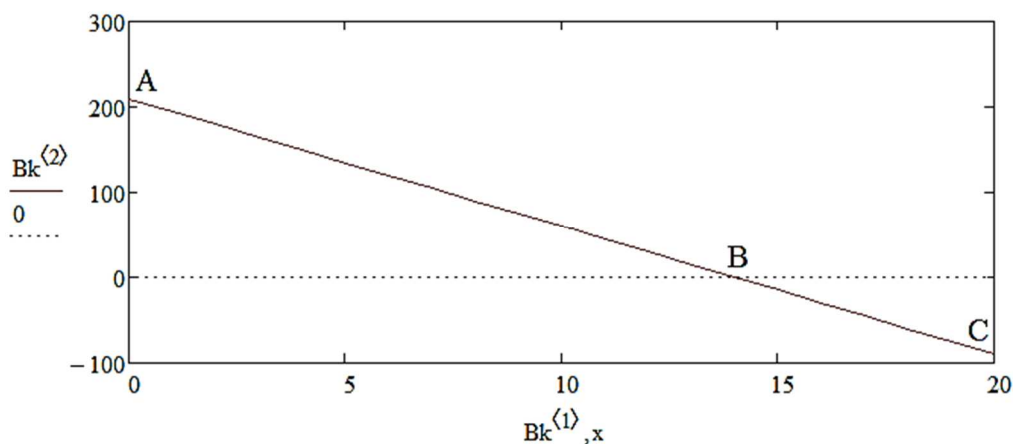


Рис. 3. Графік зміни нормальної швидкості різання вздовж профілю круга

Проаналізувавши рис. 3, можна побачити, що найбільше значення добутку $n \cdot V$ належить крайній точці шліфувального круга А, а при русі вздовж профілю інструмента зліва направо нормальна складова швидкості різання зменшується, і дорівнює нулю у точці В, потім змінює свій напрямок зі збільшенням абсолютного значення до досягнення точки С. Відповідно, ділянка АВ здійснює основну роботу зі знімання шару матеріалу з деталі. Точка В ($n \cdot V = 0$) є формоутворюючою, і визначає кінцевий профіль деталі. На ділянці ВС інструмент виходить із зони обробки, одночасно знімаючи залишковий шар металу.

Остаточний профіль деталі утворюється лінією, що проходить через точки з $n \cdot V = 0$. Умова, що визначає остаточний профіль деталі, має вигляд:

$$\frac{\partial \det(x, \theta, \theta_d)}{\partial x} \times \frac{\partial \det(x, \theta, \theta_d)}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \det(x, \theta, \theta_d)}{\partial \theta_d} = 0. \tag{9}$$

Формоутворюючі точки, в яких нормальна швидкість різання дорівнює нулю, на профілі абразивного круга можна знайти за допомогою розрахункового блока, подібного

до (8). Дані точки утворюють лінію контакту інструмента з поверхнею деталі. Обертаючи лінії контакту навколо осі деталі, одержимо реальну циліндричну поверхню вала (рис. 4).

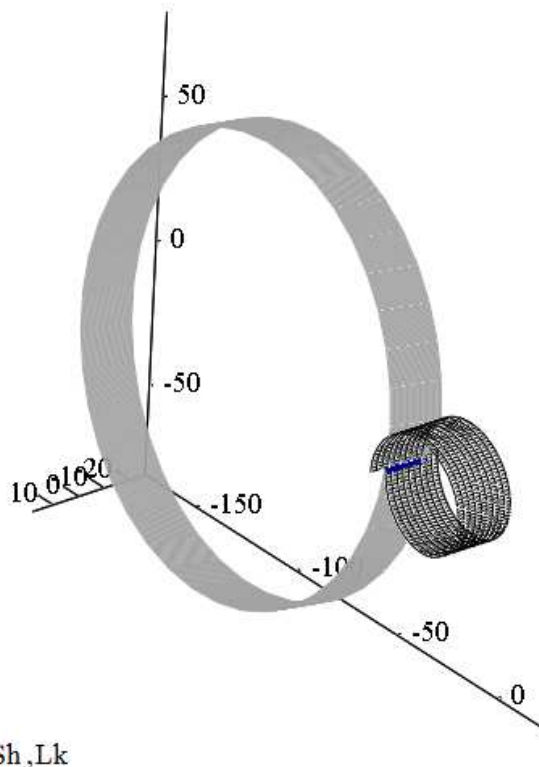


Рис. 4. Математична 3D модель інструмента, деталі та їх лінії контакту

Осьовий профіль деталі утворюється сукупністю слідів шліфувального круга (рис. 5). Згідно з рис. 5 геометрична шорсткість поверхні визначається за точкою перетину двох сусідніх слідів інструмента.

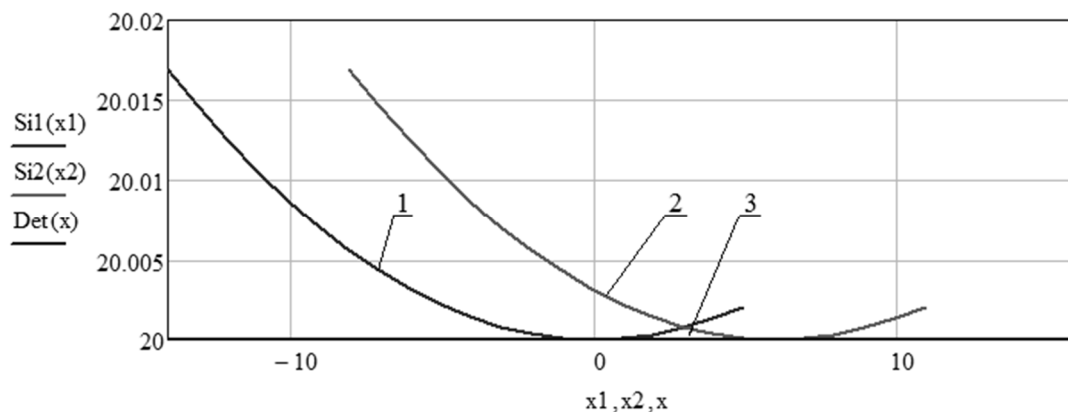


Рис. 5. Утворення геометричного профілю деталі:
1, 2 – два сусідніх сліди шліфувального круга; 3 – номінальний профіль деталі

Формоутворення номінального діаметра циліндричної поверхні вала забезпечують усі точки, які розташовані на периферії інструмента та знаходяться вздовж умовного кола, яке віддалене від торця шліфувального круга на величину калібруючої ділянки C (рис. 1). Інші точки будуть знімати деяку величину припуску та утворювати геометричну шорсткість (рис. 5).

Схема входу абразивних зерен у зону різання зображена на рис. 6.

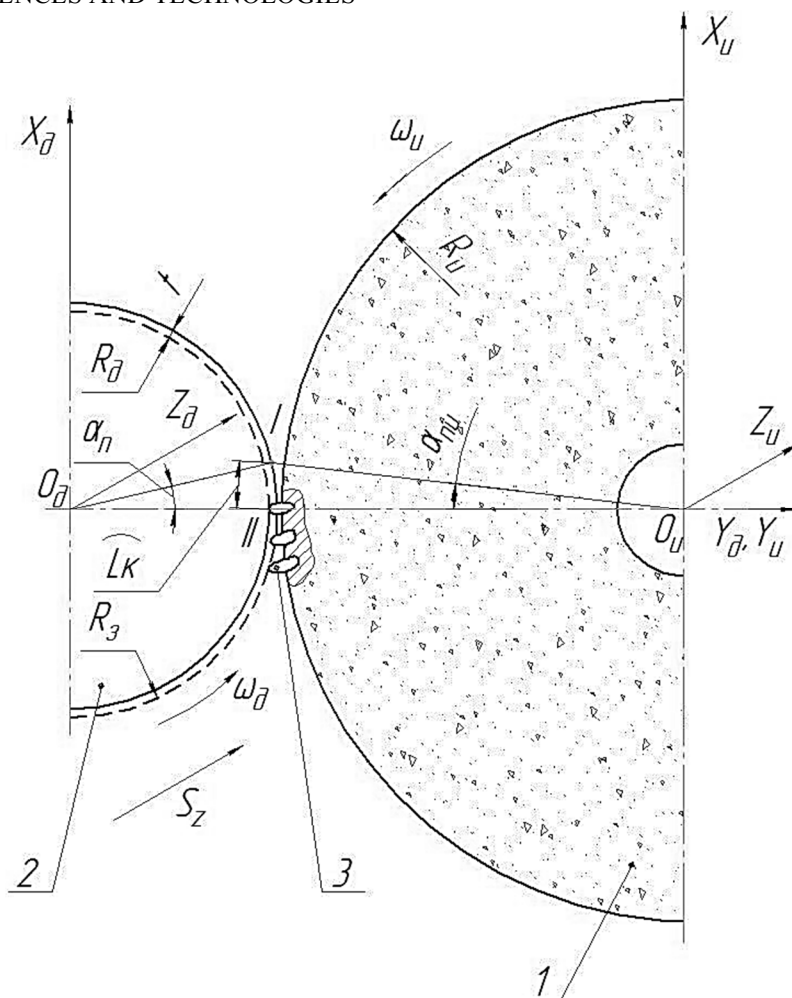


Рис. 6. Схема входу абразивних зерен у зону різання

Прийmemo на колі калібруючої ділянки абразивного круга 1 (рис. 6), зерно 3, та розглянемо процес різання циліндричної поверхні вала 2 одиничним абразивним зерном. Знехтуємо значенням осьової подачі. Згідно з рис. 6, визначимо довжину риски, яку утворює зерно на поверхні деталі. Відповідно до схеми обробки, абразивне зерно 3 починає виконувати роботу з деформації та знімання матеріалу в точці I з поверхні деталі. Остаточно із зони різання зерно виходить у точці 2. Кут входу зерна в заготовку в системі координат деталі α_n розраховується за виразом:

$$\cos(\alpha_n) = \frac{(R_d + R_u)^2 + (R_d + t)^2 - R_u^2}{2 \cdot (R_d + R_u) \cdot (R_d + t)}, \quad (10)$$

$$\cos(\alpha_{mu}) = \frac{(R_d + R_u)^2 + R_u^2 - (R_d + t)^2}{2 \cdot (R_d + R_u) \cdot R_u}, \quad (11)$$

де α_n, α_{mu} – початковий кут входу зерна в зону обробки в системі координат деталі та шліфувального круга; R_d – радіус деталі, R_u – радіус інструменту, t – глибина різання.

Врахувавши геометрію схеми обробки, кут виходу абразивного зерна із зони обробки дорівнює куту входу, тобто $\alpha_k = \alpha_n$.

У процесі різання деталей обертається, що призводить до зміни об'єму підведеного в зону обробки матеріалу.

Кількість матеріалу можна визначити, врахувавши додатковий кут:

$$\alpha_{\text{доо}} = \alpha_{\text{ну}} \cdot \frac{\omega_d}{\omega_u} = \alpha_{\text{ну}} \cdot \frac{V_d \cdot R_u}{V_u \cdot R_d}, \quad (12)$$

де ω_d, ω_u – кутова швидкість обертання деталі та інструменту; V_d, V_u – лінійні швидкості руху точок на профілі деталі та інструменту.

Сумарний кут контакту абразивного зерна з поверхнею вала:

$$\alpha_{\Sigma} = \alpha_n + \alpha_k + \alpha_{\text{доо}} = 2 \cdot \alpha_n + \alpha_{\text{доо}}. \quad (13)$$

Довжина риски, що залишить зерно на поверхні деталі:

$$L_z = (2 \cdot \alpha_n + \alpha_{\text{доо}}) \cdot R_d, \quad (14)$$

де L_z – довжина риски, яку залишить одиничне абразивне зерно на поверхні деталі.

Згідно з [7] найчастіше існує три положення абразивного зерна відносно деталі: поперечне, повздовжнє та перпендикулярне (рис. 7-9).

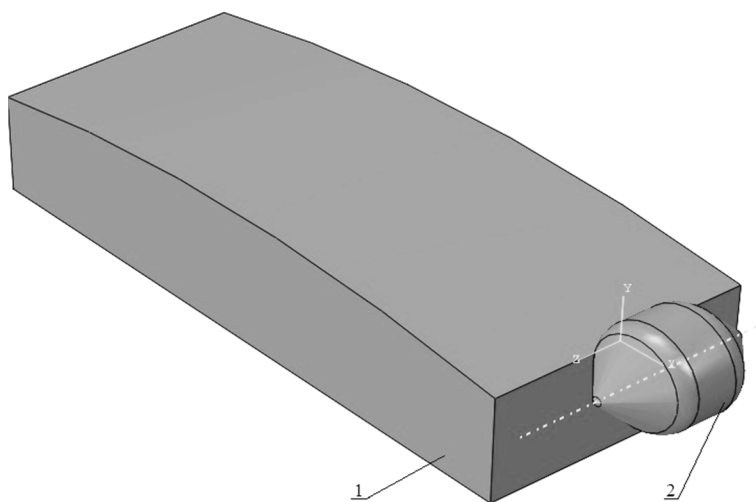


Рис. 7. Поперечне розміщення абразивного зерна відносно деталі:
1 – деталь; 2 – абразивне зерно

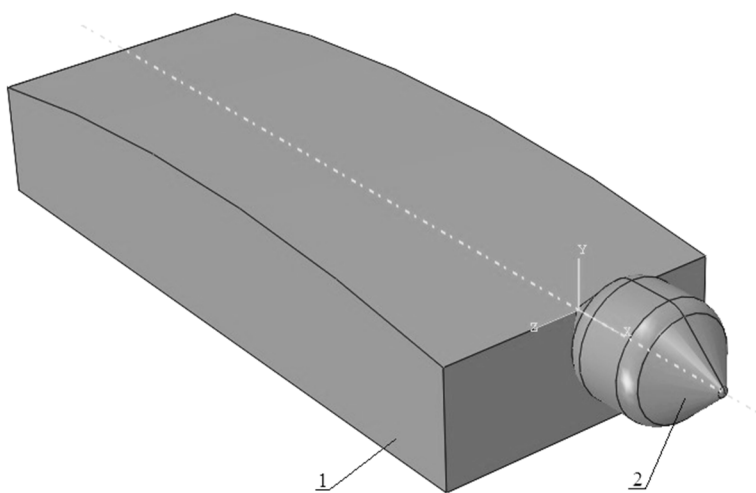


Рис. 8. Повздовжнє розміщення абразивного зерна відносно деталі:
1 – деталь; 2 – абразивне зерно

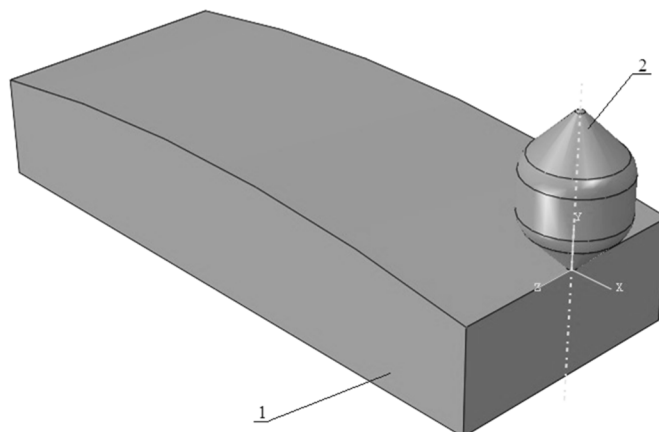


Рис. 9. Перпендикулярне розміщення абразивного зерна відносно деталі:
1 – деталь; 2 – абразивне зерно

Використовуючи дослідження в роботах [8; 9; 10], була створена 3D модель процесу різання деталі одним абразивним зерном (рис. 10).

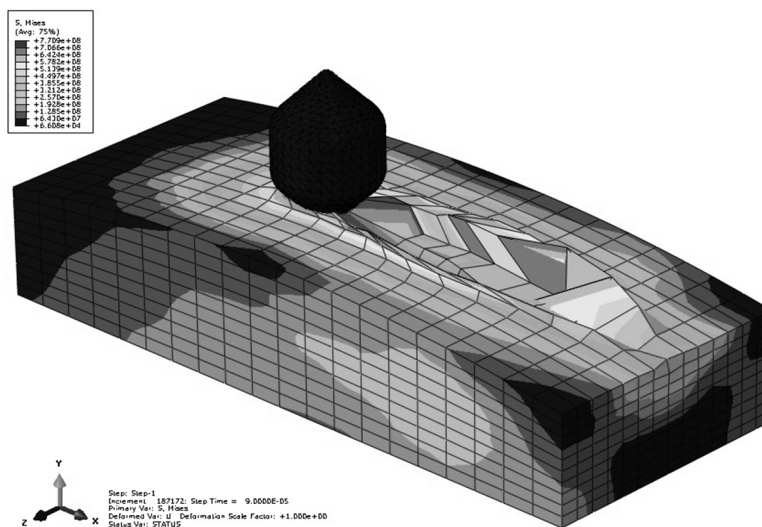


Рис. 10. 3D модель процесу різання деталі одним абразивним зерном

На рис. 11 зображено епюру навантаження від різальних та деформуючих кромek вздовж профілю абразивного зерна.

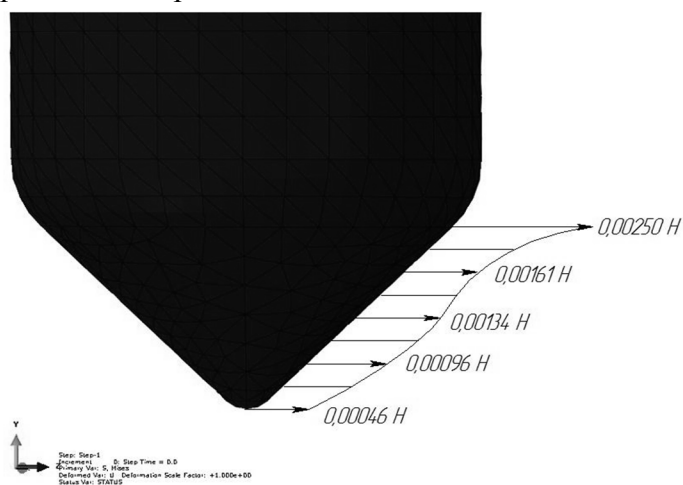


Рис. 11. Епюра навантаження від різальних та деформуючих кромek вздовж профілю абразивного зерна

Переріз абразивного зерна, в якому визначалась епюра навантаження від різальних та деформуючих кромки та, відповідно, сама епюра навантаження зображені на рис. 12 та 13.

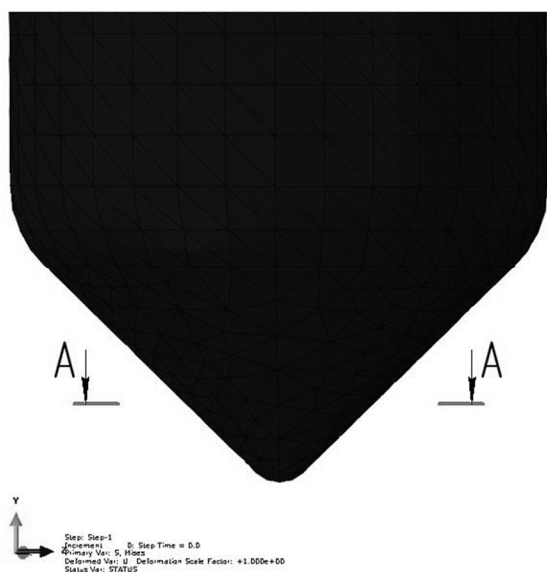


Рис. 12. Переріз абразивного зерна, в якому визначалась епюра навантаження від різальних та деформуючих кромки

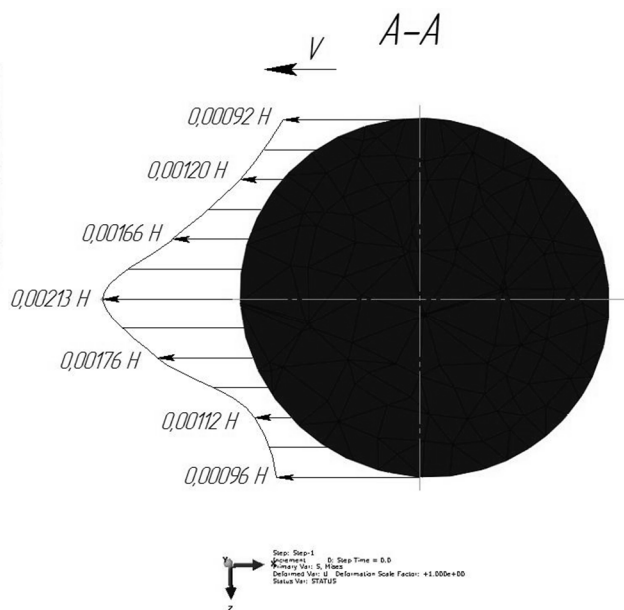


Рис. 13. Епюра навантаження від різальних та деформуючих кромки у відповідному перерізі абразивного зерна

Перед тим, як почати знімати шар матеріалу з деталі, робота абразивного зерна буде витрачатися на пружну та пластичну деформації, тертя в місці контакту та утворення напливів вздовж риски.

Висновки відповідно до статті. Розроблена загальна модульна 3D модель поверхонь шліфувального круга та деталі, зняття припуску та процесу формоутворення при чистовому шліфуванні циліндричної поверхні вала. Ця модель розподіляє припуск вздовж усієї ділянки периферії інструмента, що зменшує температуру під час шліфування та підвищує якість обробленої поверхні. Наведено методику утворення геометричного профілю деталі.

Розроблена 3D модель процесу різання деталі одним абразивним зерном. Визначено розподіл сил різання від різальних та деформуючих кромки у відповідних площинах абразивного зерна.

Список використаних джерел

1. Филимонов Л. Н. Высокоскоростное шлифование. Ленинград: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1979. 248 с.
2. Маслов Е. Н. Теория шлифования материалов. Москва: Машиностроение, 1974. 320 с.
3. Корчак С. Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. Москва: Машиностроение, 1974. 280 с.
4. Кальченко В. И., Погиба Н. Н., Кальченко Д. В. Определение составляющих силы резания при глубинном шлифовании поверхностей вращения ориентированным эльборовым кругом. *Сверхтвердые материалы: научно-теоретический журнал*. 2012. № 2. С. 58–73.
5. Кальченко В. И., Кологойда А. В., Кужельний Я. В., Морочко В. В. Однопроходное доводочное шлифование зі схрещеними осями круга та циліндричної деталі. *Технічні науки та технології*. 2018. № 4 (14). С. 9–17.
6. Родин П. Р. Основы формообразования поверхностей резанием. Киев: Вища школа, 1977. 192 с.
7. Байкалов А. К. Введение в теорию шлифования материалов. Киев: Наукова думка, 1978. 207 с.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

8. Криворучко Д. В., Залого В. А. Моделирование процессов резания методом конечных элементов: методологические основы: монография / под общей ред. В. А. Залого. Сумы: Университетская книга, 2012. 434 с.

9. Кальченко В. І., Кальченко В. В., Сіра Н. М., Кужельний Я. В. Дослідження сил різання одиночного абразивного зерна при шліфуванні зі схрещеними осями круга та деталі. *Технічні науки та технології*. 2018. № 2 (12). С. 59–68.

10. Основы теории резания материалов: Учебник / Н. П. Мазур и др. 2-е изд., перераб. и доп. Харьков: НТУ «ХПИ», 2013. 534 с.

References

1. Filimonov L.N. (1979). *Vysokoskorostnoe shlifovanie [High-speed grinding]*. Leningrad: Mashinostroenie leningraskoe otdelenie [in Russian].

2. Maslov, E. N. (1974). *Teoriia shlyfovaniia materialov [The theory of grinding of materials]*. Moscow: Mashynostroenye [in Russian].

3. Korchak, S. N. (1974). *Proizvoditelnost protcessa shlifovaniia stalnykh detalei [Productivity of the the grinding process of steel parts]*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian]

4. Kalchenko, V. I., Pogiba, N. N. & Kalchenko, D. V. (2012). Opredelenie sostavliaiushchikh sily rezaniia pri glubinnom shlifovanii poverkhnosti vrashcheniia orientirovannym elborovym krugom [Determination of the components of the cutting force for deep grinding of surfaces of revolution by an oriented elbor wheel]. *Sverkhverdye materialy – Superhard materials*, 2 (196), 58–73 [in Russian].

5. Kalchenko, V. I., Kolohoida, A. V., Kuzhelnyi, Ya. V. & Morochko, V. V. (2018). Od-nopromkhidne dovodochne shlifuvannia zi skhreshchenymy osiamy kruha ta tsylindrychnoi detali [Single pass finishing grinding with crossed axes tool and cylindrical part]. *Tekhnichni nauky ta tekhnologii – Technical sciences and technologies*, 4 (14), 9–17 [in Ukrainian].

6. Rodyn, P. R. (1977) *Osnovy formoobrazovaniya poverkhnostey rezaniem. [Basics of forming surfaces by cutting]*. Kiev: Vyshcha shkola [in Russian].

7. Baikov, A. K. (1978) *Vvedenie v teoriyu shlifovaniia materialov [Introduction to the theory of grinding materials]*. Kiev: Naukova dumka [in Ukrainian].

8. Krivoruchko, D. V., Zaloga, V. A. (Ed.) (2012). *Modelirovanie protsessov rezaniya metodom konechnykh elementov: metodologicheskie osnovy: monografiya [Modeling of finite element cutting processes: methodological foundations]*. Sumy: Universitetskaia kniga [in Russian].

9. Kalchenko, V. I., Kalchenko, V. V., Sira, N. M., Kuzhelnyi, Ya. V. (2018). Doslidzhennia syl ryzaniia odynychnoho abrazyvnoho zerna pry shlifuvanni zi skhreshchenymy osiamy kruha ta detali [Investigation of the cutting forces of a single abrasive grain when grinding with crossed axes of a circle and a part]. *Tekhnichni nauky ta tekhnologii – Technical sciences and technologies*, 2 (12), 59–68 [in Ukrainian].

10. Mazur, N. P., Vnukov, Yu. N., Grabchenko, A. I., Dobroskok, V. L., Zaloga, V. A., Novoselov, Yu. K., Jakubov, F. Ya. (2013). *Osnovy teorii rezaniia materialov [Fundamentals of the theory of cutting materials]*. Kharkiv: NTU «KhPI» [in Ukrainian].

UDC 621.923.42

Vitalii Kalchenko, Volodymyr Kalchenko, Yaroslav Kuzhelnyi, Volodymyr Morochko

DETERMINATION OF CUTTING FORCES DURING FINISHING GRINDING OF THE CYLINDRICAL SURFACE OF THE SHAFT

Urgency of the research. During the grinding process of the oriented circle, the cutting forces of the abrasive grains are applied on the tool. Determining of the cutting forces in the grinding zone allows to choose the optimal modes of processing.

Target setting. The final result of the processing of the cylindrical surface of the shaft is influenced by a variety of factors, which, in turn, depend on the abrasive wheel. The orientation of the abrasive grains in the tool affects the size and direction of cutting forces during processing. During round grinding, the distribution of the cut material along the edge of the circle and its wear are not rational.

Actual scientific researches and issues analysis. There are ways of deep grinding with crossed axes of the abrasive wheel and the parts in which the orientation angle of the cutting tool is chosen depending on the greatest productivity of the grinding process. Two methods are used to determine the cutting forces: empirical and calculation-experimental. Created a method of single pass finishing grinding of smooth cylindrical surfaces, which ensures high precision of machining.

Uninvestigated parts of general matters defining. The absence of a research of the cutting forces that arise in the process of finishing the grinding of the cylindrical surface of the shaft.

The research objective. Development of the general modular 3D model of surfaces of a grinding wheel and a part, the process of molding and rejection of allowance, at the grinding cylindrical surface of a shaft. Creation of a 3D model the process of cutting the details by single abrasive grain at the finishing grinding. Determination the cutting forces distribution from cutting and deforming edges in the corresponding planes of abrasive grain.

The statement of basic materials. For a method of finishing grinding cylindrical surface of a shaft oriented grinding wheel, mathematical 3D models of the surface of the grinding wheel and parts are developed. Models of allowance rejection and shaping are created. A 3D model of the cutting process of a single abrasive grain has been created. The distribution of cutting forces from cutting and deforming edges in the corresponding planes of abrasive grain is determined.

Conclusions. Modular 3D models of surfaces of the grinding wheel and parts, rejection of allowance and shaping during the finishing grinding of the cylindrical surface of the shaft are created. A 3D model of the cutting process with a single abrasive grain was developed and the distribution of cutting forces from cutting and deforming edges in the corresponding planes of abrasive grain was determined.

Keywords: abrasive grain; cutting forces; 3D model of cutting; oriented tool; grinding process.

Fig.: 13. **References:** 10.

Кальченко Віталій Іванович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Kalchenko Vitalii – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head road Transport Industry and Mechanical Engineering Department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: kalchenkovi@ukr.net

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9850-7875>

ResearcherID: G-9477-2014

Кальченко Володимир Віталійович – доктор технічних наук, професор, проректор з науково-педагогічної роботи, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Kalchenko Volodymyr – Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-rector in scientific and pedagogical work, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: vvkalchenko74@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9072-2976>

ResearcherID: G-6752-2014

Кужельний Ярослав Володимирович – викладач кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Kuzhelnyi Yaroslav – teacher of the Department of Road Transport Industry and Mechanical Engineering, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: k.y.v.immortal@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5269-8557>

ResearcherID: J-1127-2016

Морочко Володимир Вікторович – магістр, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Morochko Volodymyr – master, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: itmia@ukr.net

Олена Сліднікова, Володимир Винник, Василь Скляр, Ольга Аксьонова

МОДУЛЬНЕ 3D-МОДЕЛЮВАННЯ ІНСТРУМЕНТІВ, ПРОЦЕСУ ЗНЯТТЯ ПРИПУСКУ ТА ФОРМОУТВОРЕННЯ ПРИ ФРЕЗЕРУВАННІ КУЛАЧКІВ ЗІ СХРЕЩЕНИМИ ОСЯМИ ІНСТРУМЕНТА ТА ДЕТАЛІ

Актуальність теми дослідження. Забезпечення високих показників точності та якості кулачків розподільних валів та текстильних машин при забезпеченні високої продуктивності їх обробки є актуальним завданням у машинобудуванні.

Постановка проблеми. Висока точність оброблених поверхонь кулачків розподільних валів та текстильних машин забезпечить правильну роботу вузлів та збільшить ресурс експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У відомих способах фрезерування при обробці кулачків глибина різання різна, подача по контуру нерівномірна, що знижує продуктивність обробки та точність обробленої деталі.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Спосіб фрезерування кулачків розподільних валів та текстильних машин орієнтованим інструментом, який забезпечує високі показники точності та продуктивності обробки не розроблено.

Постановка завдання. Розробка нового способу фрезерування кулачків розподільних валів та текстильних машин зі схрещеними осями інструмента та деталі, що забезпечить підвищення точності оброблених поверхонь та продуктивність обробки.

Виклад основного матеріалу. Розроблено новий спосіб фрезерування кулачків розподільних валів, де обробка ведеться інструментом, висота якого менша довжини кулачка. Фрезерування кулачків розподільного валу виконується за один установ фрезою зі схрещеними осями її та деталі. При обробці кулачків забезпечується стабілізація зняття притуску та подачі по контуру, що підвищує точність та продуктивність обробки.

Висновки відповідно до статті. Запропонований новий спосіб фрезерування кулачків розподільних валів та текстильних машин зі схрещеними осями інструмента та деталі. Запропонована методика фрезерування криволінійних поверхонь на верстатах із ЧПК може бути застосована для процесів фрезерування різноманітних циліндричних поверхонь складного профілю зі схрещеними осями інструмента і деталі.

Ключові слова: фрезерування; модульне тривимірне геометричне моделювання; орієнтований інструмент; формоутворення; розподільний вал; кулачок текстильної машини.

Рис.: 12. Бібл.: 21.

Актуальність теми дослідження. Постійно підвищуються вимоги до точності та продуктивності обробки різноманітних циліндричних поверхонь складного профілю, які широко застосовуються в машинобудуванні, автомобілебудуванні, тракторобудуванні, суднобудуванні та інших галузях промисловості, зокрема, при виробництві устаткування для легкої промисловості. Розробка більш ефективних універсальних способів фрезерування деталей дозволить отримати високу продуктивність їх обробки при забезпеченні необхідної точності.

Постановка проблеми. Фрезерування є продуктивним способом обробки кулачків розподільних валів та текстильних машин тощо. Для забезпечення необхідної точності обробки циліндричних поверхонь складного профілю актуальним є вдосконалення наявних та розробка нових способів обробки зі схрещеними осями фрези і деталі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У статті [1] розглянуто спосіб обробки деталі двома торцевими фрезами. У роботах [2; 3] наведені дослідження процесів фрезерування тіл обертання.

У роботі [4] проведені дослідження фрезерування деталей набором дискових фрез, недоліком є складність виготовлення інструменту.

На вітчизняних підприємствах [5] обробка кулачків відбувається на верстатах із ЧПК. При обробці кулачка деталь обертається, а інструмент здійснює зворотно-поступальний рух у горизонтальній площині, забезпечуючи обкатку профілю.

Відома фірма Junker (Німеччина) [6; 7] виконує обробку розподільних валів вузьким шліфувальним кругом 1, висота якого менша довжини опорних шийок (рис. 1). При обробці кулачків інструмент здійснює зворотно-поступальний рух у площині, яка проходить через вісь обертання інструмента 1 та деталі 2. Положення шліфувального круга 4, 5 при повороті кулачка 6, 7 зображено на рис. 2. Подача по контуру та глибина різання

при цьому змінюються за координатою обробки, що зменшує продуктивність обробки та точність обробленої поверхні.

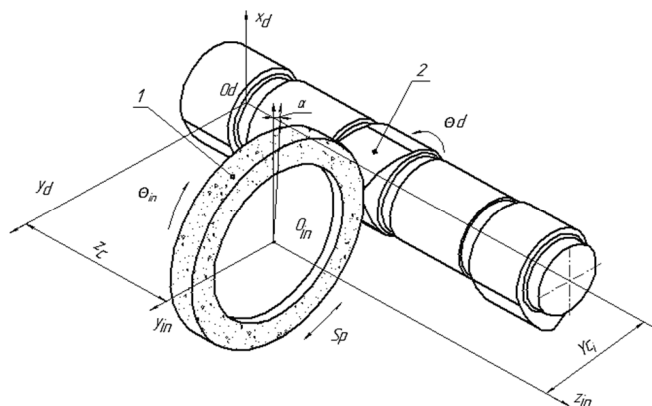


Рис. 1. Схема шліфування розподільного вала фірмою Junker

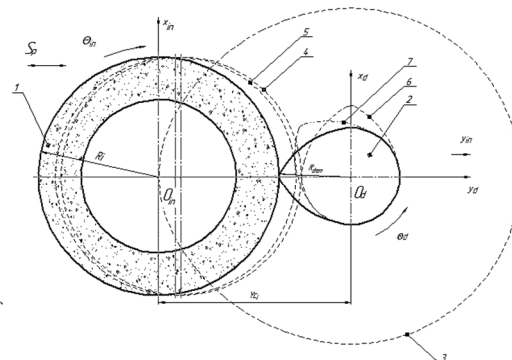


Рис. 2. Схема обробки кулачка розподільного вала фірмою Junker

У роботах [8; 9] проведені дослідження процесу формоутворення при шліфуванні колінчастих та розподільних валів.

У статті [10] запропоновано спосіб обробки ступінчастого вала орієнтованою фрезою. При цьому чорнова обробка здійснюється торцевою поверхнею фрези та периферією зуба, а чистове фрезерування – периферією.

При використанні фрез, що оснащені пластинками з надтвердого матеріалу на основі кубічного нітриду бору [11; 12], забезпечується висока стійкість різального інструменту при чистовій обробці.

Дослідженню процесу обробки ступінчастих валів присвячені роботи [13–17].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. При обробці кулачка під час обертання розподільного вала точка контакту інструмента з деталлю виходить із площини, яка проходить через осі обертання фрези та деталі, це приводить до зміни глибини врізання. Глибини врізання при цьому завжди більше величини припуску, що знімається. Це є причиною нерівномірності зняття припуску, знижує продуктивність і точність обробки.

Мета статті. Метою статті є дослідження процесу фрезерування кулачків розподільних валів та текстильних машин, розробка модульного 3D-моделювання. На базі аналізу модульного 3D-моделювання, створення нового способу фрезерування розподільного вала за один установ орієнтованим інструментом, який забезпечить стабілізацію зняття припуску та подачі по контуру.

Виклад основного матеріалу. Схема процесу фрезерування розподільного вала 2 повернутим на кут β інструментом 1, представлена на рис. 3, а. Обробка кулачків розподільного вала відбувається за один установ. На рис. 3, б зображено переріз А-А, при чистовій обробці зрізання всього припуску t відбувається периферією фрези, вісь повороту фрези знаходиться в точці А для забезпечення роботи всієї периферії фрези.

При обертанні розподільного вала 1 на кут Θ_{det} (рис. 4, а, б) точка контакту 3 фрези 2 з кулачком розподільного вала 1 переміщується за рахунок синхронних вертикального і поперечного рухів інструмента S_{inst} , вона завжди перебуває в горизонтальній площині, яка проходить через вісь обертання фрези та центр кривизни деталі, це забезпечує постійну глибину різання та подачу по контуру.

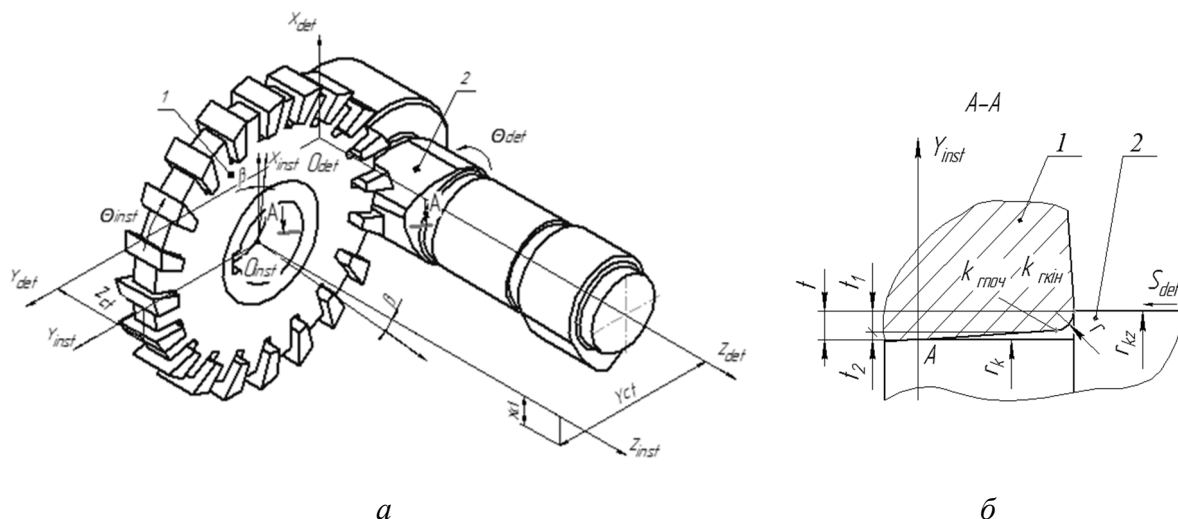


Рис. 3. Схема фрезерування розподільного вала зі схрещеними осями інструмента та деталі

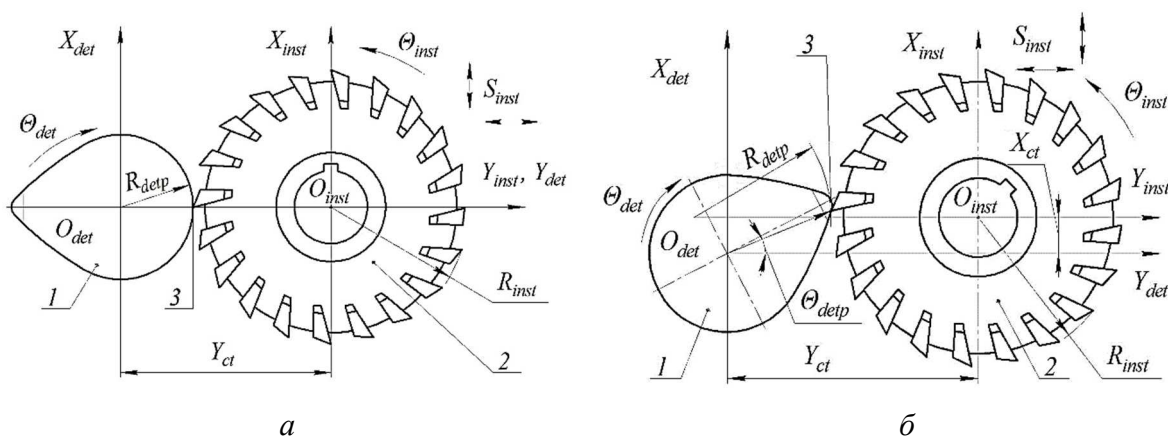


Рис. 4. Схема обробки кулачка

Нерівномірне обертання розподільного вала при фрезеруванні кулачка стабілізує зняття припуску та подачу по контуру (рис. 5, б) в порівнянні з методом обробки з рівномірним обертанням (рис. 5, а).

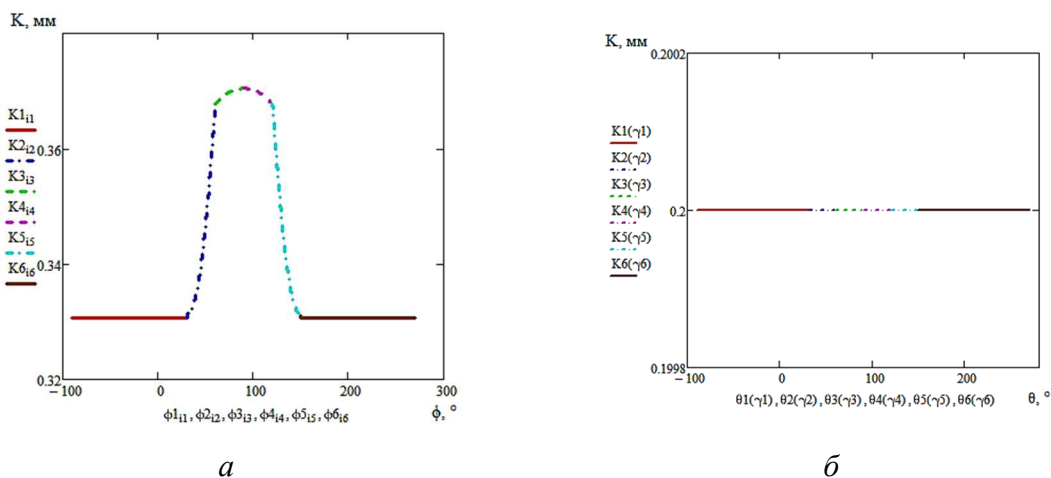


Рис. 5. Подача по контуру

Це дозволить при фрезеруванні поверхонь на верстатах із ЧПК враховувати тільки форму деталі, виключаючи вплив радіуса інструмента і його знос на точність формоутворення. Завдяки чому підвищується продуктивність і якість обробки.

Модульну 3D-модель поверхні фрези описуємо циліндричним інструментальним модулем:

$$\bar{r}_{If} = MC^I_{Z_{If}(k) \cdot \Theta_{If} \cdot R_{If}(k)} \cdot \bar{e}_4, \quad (1)$$

де \bar{r}_{If} – радіус-вектор інструментальної поверхні фрези; $MC^I_{Z_{If}(k) \cdot \Theta_{If} \cdot R_{If}(k)}$ – циліндричний інструментальний модуль формоутворення фрези; \bar{e}_4 – радіус-вектор початку координат [18]; $Z_{If}(k)$ – k -та осьова координата інструментальної поверхні фрези, Θ_{If} – кут повороту інструмента навколо осі $O_{inst}Z_{inst}$, $R_{If}(k)$ – k -тий радіус інструментальної поверхні фрези.

Інструментальний циліндричний модуль формоутворення фрези описується добутком однокоординатних матриць:

$$MC^I_{Z_{If}(k) \cdot \Theta_{If} \cdot R_{If}(k)} = M^3(Z_{If}(k)) \cdot M^6(\Theta_{If}) \cdot M^2(R_{If}(k)), \quad (2)$$

де $M^1, M^2, M^3, M^4, M^5, M^6$ – однокоординатні матриці, що описують переміщення вздовж осей $X_{inst}, Y_{inst}, Z_{inst}$ та повороти навколо них $O_{inst}X_{inst}, O_{inst}Y_{inst}, O_{inst}Z_{inst}$, відповідно [19].

Номінальна поверхня оброблюваної деталі описується добутком радіус-вектора інструментальної поверхні фрези, модуля орієнтації та модуля формоутворення:

$$\bar{r}_{Df} = MC^F_{Z_{ct}(\Theta_{Df}) \cdot \Theta_{Df} \cdot Y_{ct}(\Theta_{Df})} \cdot MS^O_{\beta \cdot X_{ct}} \cdot \bar{r}_{If}, \quad (3)$$

де β – кут нахилу фрези відносно вісі $O_{inst}Y_{inst}$; X_{ct}, Y_{ct} – міжосьова відстань фрези і деталі у вертикальній та горизонтальній площині відповідно; Θ_{Df} – кут повороту деталі; Z_{ct} – подача, яка описує рух деталі вздовж осі $O_{det}Z_{det}$ відносно фрези.

При обробці кулачка координати X_{ct}, Y_{ct} змінюються і залежать від кутової координати повороту кулачка, при обробці ділянки кулачка, центр якої збігається з віссю розподільного вала X_{ct} дорівнює нулю, а Y_{ct} не змінюється.

Для визначення профілю обробленої поверхні деталі використовується умова контакту профілів інструмента і деталі в різні моменти часу [20, 21].

Для визначення лінії контакту 1 (рис. 6, 7) кулачка 3 та різальної кромки фрези 2 використовується методика, що наведена в роботі [21]. На рис. 6, 7: k – k -та координата периферії різальної кромки фрези, $k_{гпоч}$ та $k_{кін}$ – початкова та кінцева координати заокруглення різальної кромки фрези відповідно.

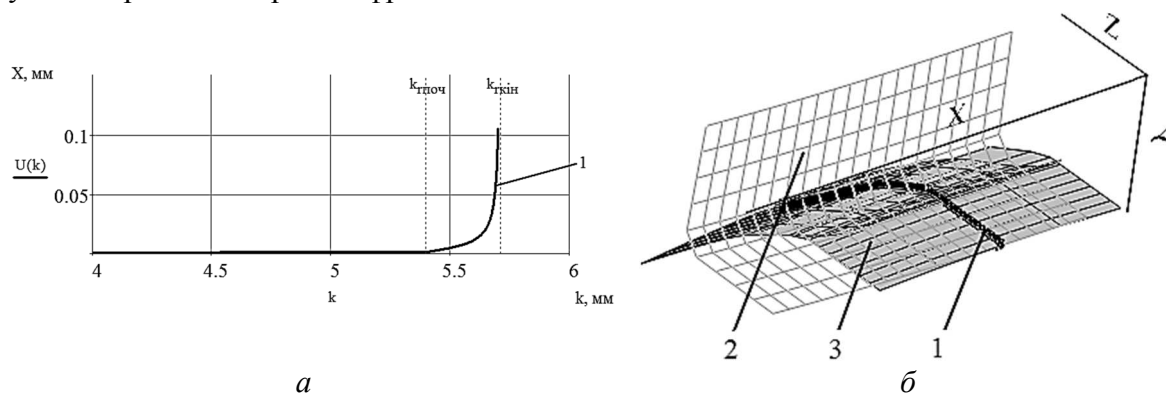


Рис. 6. Лінія контакту різальної кромки фрези та кулачка розподільного вала при обробці ділянки кулачка, центр якої збігається з центром кулачка

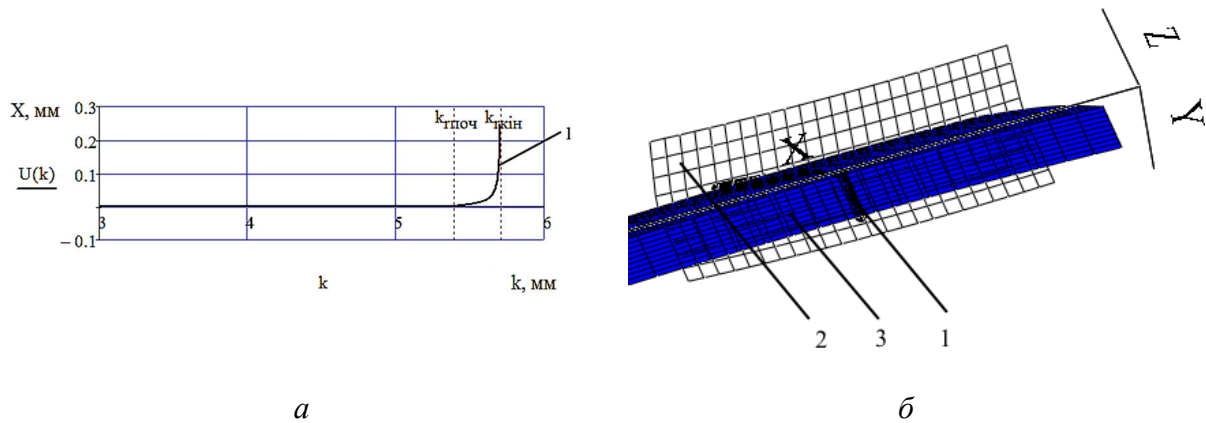


Рис. 7. Лінія контакту різальної кромки фрези та кулачка розподільного вала при обробці ділянки кулачка найбільшого радіуса

На рисунках 8, а, 9, а зображені лінії: 1 – перетину зовнішнього циліндру заготовки і фрези; 2 – перетину фрези і торця заготовки; 3 – контакту.

Плями контакту розподільного вала з фрезою 4 при обробці кулачка 5 зображені на рисунках 8, б, 9, б, які обмежені лініями перетину 1, 2, 3 орієнтованої фрези і торця заготовки.

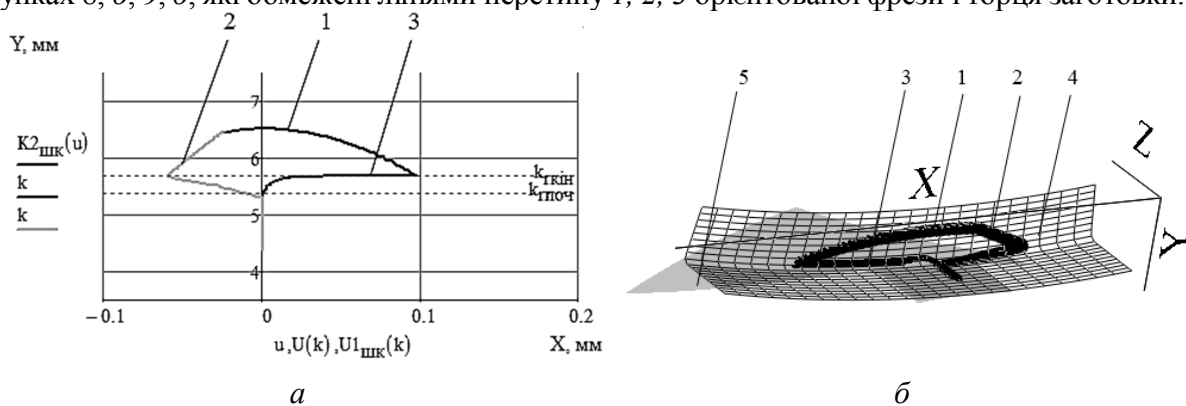


Рис. 8. Пляма контакту фрези й кулачка розподільного вала при обробці ділянки кулачка, центр якої збігається з центром кулачка

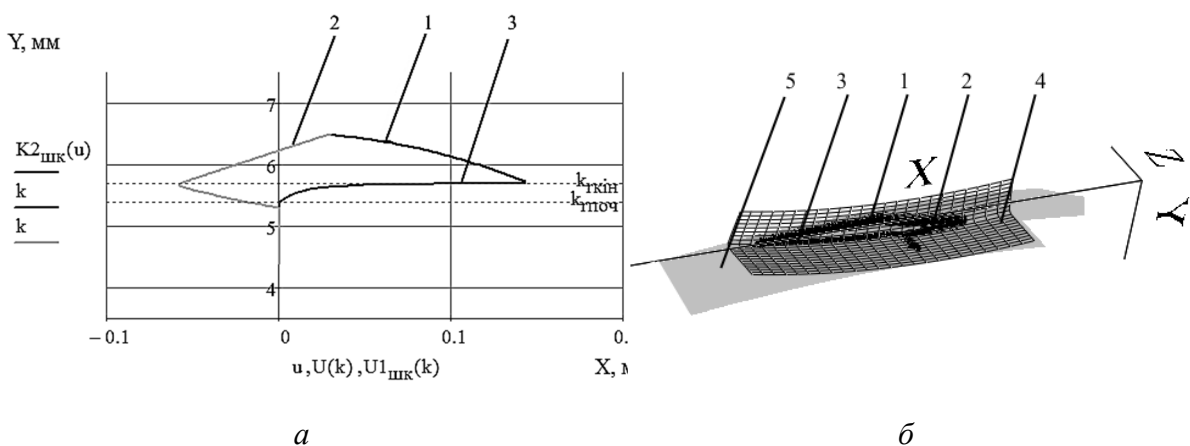


Рис. 9. Пляма контакту фрези й кулачка розподільного вала при обробці ділянки кулачка найбільшого радіуса

3D модель поверхні кулачка розподільного вала (рис. 10) утворена рухом лінії контакту по еквідистанті до поверхні кулачка.

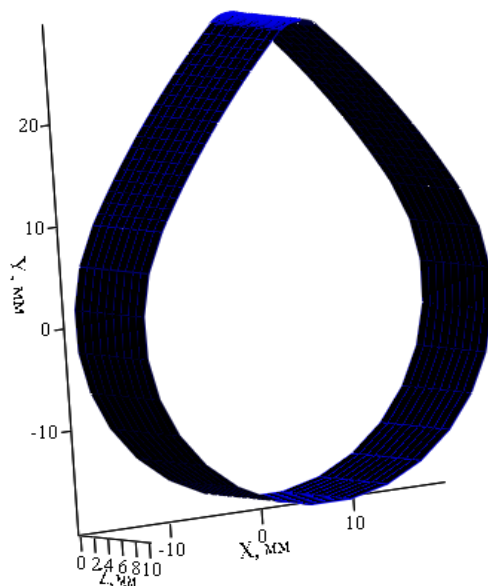


Рис. 10. 3D модель поверхні кулачка розподільного вала

За методикою, наведеною в роботі [10], отримані графіки залежності величини відхилення від круглості δ при фрезеруванні ділянки кулачка, центр якої збігається з центром кулачка (рис. 11, а, 12, а) та при обробці ділянки кулачка найбільшого радіуса (рис. 11, б, 12, б) від частоти обертання інструменту ω_{inst} (рис. 11, а, б), діаметра фрези D_{inst} (рис. 12, а, б).

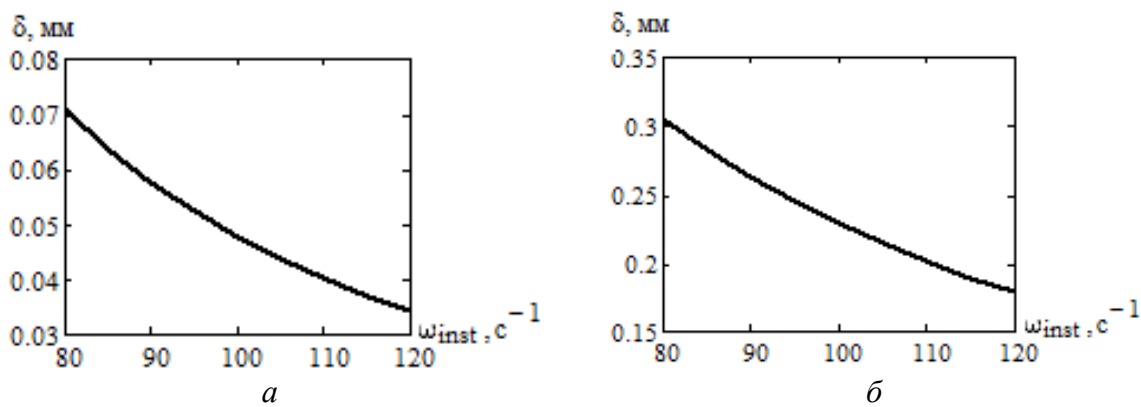


Рис. 11. Залежність відхилення від круглості δ кулачка від частоти обертання ω_{inst}

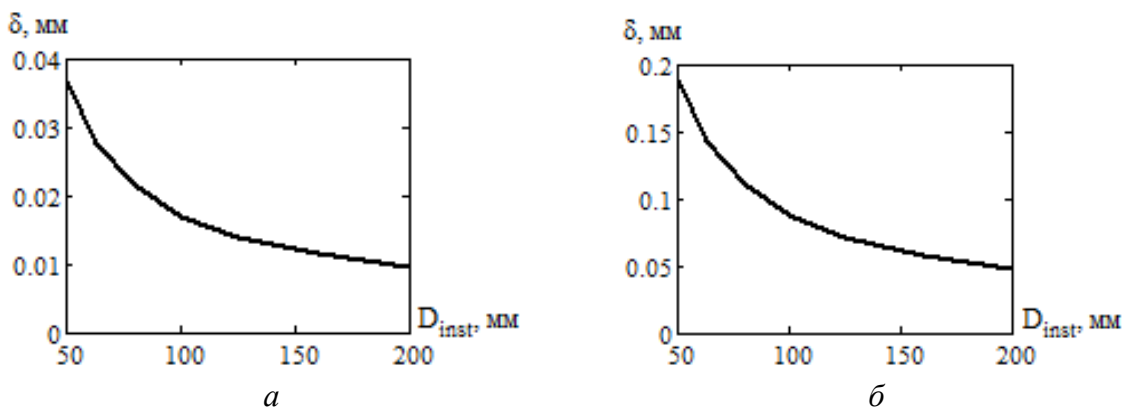


Рис. 12. Залежність відхилення від круглості δ кулачка від діаметра фрези D_{inst}

Висновки відповідно до статті. Запропоновано новий спосіб фрезерування кулачків розподільних валів та текстильних машин на базі трьох уніфікованих модулів: інструментального, орієнтації та формоутворення. Цей спосіб забезпечує стабілізацію глибини різання та подачі по контуру. У цьому способі фреза дотикається до деталі по нормалі, а оскільки дотична до поверхонь завжди вертикальна, додаткові деформації та напруження не виникають. Також покращує умови обробки, підвищує точність та якість обробленої деталі незмінна швидкість різання. Запропонована в статті методика фрезерування кулачків розподільних валів на верстатах із ЧПК виключає вплив радіуса фрези і її знос на точність формоутворення оброблюваної криволінійної поверхні, враховує тільки форму деталі. Ця методика може бути застосована також при обробці колінчастих валів і інших циліндричних поверхонь складного профілю при обробці орієнтованим інструментом.

Список використаних джерел

1. Полетаев В. А., Волков Д. И. Особенности стружкообразования при фрезеровании и фрезоточении тел вращения. *Инженерный журнал*. 2001. № 7. С. 18–21.
2. Этин А. О. Кинематический анализ методов обработки металлов резанием. Москва: Машиностроение, 1964. 324 с.
3. Полетаев В. А. Конструктивные особенности приводов подач станков для кругового фрезерования. *Инженерный журнал*. 2001. № 8. С. 63–64.
4. Грязев М. В., Степаненко А. В. Перспективные технологии обработки поверхностей вращения фрезерованием. *Известия ТулГУ. Серия Технические науки*. 2010. Вып. 2. Ч. 1. С. 130–136.
5. Шлифовальные станки завод «Харверст». *Харьковский станкостроительный завод «Харверст»*. Харьков, 20 с. URL: www.harverst.com.ua.
6. Шлифование распределительных валов кругами из кубического нитрида бора. *Проспект фирмы «Junker maschinen» на станки «JUCAM 1000», «JUCAM 3000», «JUCAM 5000», «JUCAM 6000»*. Erwin Junker. Maschinen fabric GmbH, Junkerstraße 2. 77787 Nordrath. Germany, 2006. 8 с.
7. CBN crankshaft grinding. *Prospect firm «Junker maschinen» on machines «JUCRANK 1000», «JUCRANK 3000», «JUCRANK 5000», «JUCRANK 6S/L/XL»*. Erwin Junker. Maschinen fabric GmbH, Junkerstraße 2. 77787 Nordrath. Germany, 2012. 12 p.
8. Кальченко В. І., Кальченко Д. В. Модульне 3D-моделювання інструментів, процесу зняття припуску та формоутворення при шліфуванні зі схрещеними осями колінчастого вала і круга. *Резание и инструмент в технологических системах*. 2014. Вып. 84. С. 107–114.
9. Кальченко В. І., Кальченко Д. В., Следнікова О. С. Модульне 3D-моделювання інструментів, процесу зняття припуску та формоутворення при шліфуванні зі схрещеними осями розподільного вала і круга. *Резание и инструмент в технологических системах*. 2015. Вып. 85. С. 98–106.
10. Кальченко В. В., Сіра Н. М., Кальченко Д. В., Аксьонова О. О. Дослідження процесу фрезерування циліндричних поверхонь зі схрещеними осями інструмента та вала. *Технічні науки та технології*. 2018. № 4 (14). С. 18–27.
11. Клименко С. А., Петруша И. А., Копейкина М. Ю., Мельничук Ю. А., Муковоз В. С. Разработка ПСТМ на основе КНБ для оснащения высокоэффективных режущих инструментов. *Резание и инструмент в технологических системах*. 2011. Вып. 79. С. 93–101.
12. Клименко С. А., Копейкина М. Ю., Клименко С. А., Манохин А. С. Концепция повышения работоспособности режущих инструментов из поликристаллических композитов на основе кубического нитрида бора. *Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві*. 2016. Вып. 2(13). С. 108–114.
13. Кальченко В. І., Кальченко В. В., Сіра Н. М. Модульне 3D-моделювання інструментів, процесів зняття припуску та формоутворення при шліфуванні зі схрещеними осями циліндричного та ступінчастого вала і ельборового круга. *Резание и инструмент в технологических системах*. 2016. Вып. 86. С. 36–48.
14. Кальченко В. І., Кальченко Д. В. Модульне 3D-моделювання інструментів, процесу зняття припуску та формоутворення при шліфуванні зі схрещеними осями ступінчастого вала і круга. *Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки»: науковий збірник*. 2013. № 3 (67). С. 68–77.

15. Кальченко В. И., Погиба Н. Н., Кальченко Д. В. Определение составляющих силы резания при глубинном шлифовании поверхностей вращения ориентированным эльборовым кругом. *Сверхтвердые материалы: научно-теоретический журнал*. 2012. № 2 (196). С. 58–73.
16. Kalchenko V., Yeroshenko A., Boyko S., Sira N. Determination of cutting forces in grinding with crossed axes of tool and workpiece. *Acta Mechanica et Automatica*. 2017. Vol. 11, No. 1 (39). P. 58–63.
17. Кальченко В. И., Кологойда А. В., Кужельний Я. В., Морочко В. В. Однопрохідне доводочне шліфування зі схрещеними осями круга та циліндричної деталі. *Технічні науки та технології*. 2018. № 4 (14). С. 9–17.
18. Грабченко А. И., Кальченко В. И., Кальченко В. В. Шлифование со скрещивающимися осями инструмента и детали: монография. Чернигов: ЧДТУ, 2009. 256 с.
19. Решетов Д. Н., Портман В. Т. Точность металлорежущих станков. Москва: Машиностроение, 1996. 336 с.
20. Родин П. Р. Основы формообразования поверхностей резанием. Киев: Вища школа, 1977. 192 с.
21. Кальченко В. И., Погиба Н. Н., Кальченко Д. В. Повышение производительности и точности шлифования со скрещивающимися осями эльборового круга и ступенчатого валика. *Резание и инструмент в технологических системах*. 2011. Вып. 80. С. 131–140.

References

1. Poletaev, V. A., Volkov, D. I. (2001). Osobennosti struzhkoobrazovaniia pri frezerovanii i frezotochenii tel vrascheniia [Features of chip formation during milling and milling rotation bodies]. *Inzhenernyi zhurnal – Engineering magazine*, 7, 18–21 [in Russian].
2. Etin, A. O. (1964). *Kinematicheskii analiz metodov obrabotki metallov rezaniem [Kinematic analysis of metal cutting methods]*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
3. Poletaev, V.A. (2001). Konstruktivnye osobennosti privodov podach stankov dlia krugovogo frezerovaniia [Design features of feed drives for circular milling machines]. *Inzhenernyi zhurnal – Engineering magazine*, 8, 63–64 [in Russian].
4. Gryazev, M. V., Stepanenko, A. V. (2010). Perspektivnye tehnologii obrabotki poverhnostei vrascheniia frezerovaniem [Promising technologies for surface treatment of milling]. *Izvestiia TulGU. Seriya Tehnicheskie nauki – News of TulSU. Series Engineering*, 2 (1), 130–136 [in Russian].
5. Shlifovalnye stanki zavod «Kharverst» [Grinding machines Plant Harverst]. Kharkiv. Retrieved from www.harverst.com.ua.
6. Shlifovanie raspredelitelnykh valov krugami iz kubicheskogo nitrida bora [Grinding camshafts with cubic boron nitride circles] (2006). In *Prospekt firmy «Junker maschinen» na stanki «JUCAM 1000», «JUCAM 3000», «JUCAM 5000», «JUCAM 6000» – Prospectus of the company "Junker maschinen" on machine tools "JUCAM 1000", "JUCAM 3000", "JUCAM 5000", "JUCAM 6000"* [in Russian].
7. CBN crankshaft grinding (2012). In *Prospekt firm «Junker maschinen» on machines «JUCRANK 1000», «JUCRANK 3000», «JUCRANK 5000», «JUCRANK 6S/L/XL»* [in Germany].
8. Kalchenko, V. I., Kalchenko, D. V. (2014). Modulne 3D-modeliuvannia instrumentiv, protsesu zniattia pryusku ta formoutvorennia pry shlifuvanni zi skhreshchenymy osiamy kolinchastoho vala i kruha [Modular 3D modeling of tools, process of pulling down and shaping when grinding with crossed axles of crankshaft and a circle]. *Rezanie i instrument v tekhnologicheskikh sistemakh – Cutting & tool in technological system*, 84, 107–114 [in Ukrainian].
9. Kalchenko, V. I., Kalchenko, D. V., Sliednikova, O. S (2015). Modulne 3D-modeliuvannia instrumentiv, protsesu zniattia pryusku ta formoutvorennia pry shlifuvanni zi skhreshchenymy osiamy rozpodilchoho vala i kruha [Modular 3D-modeling tools, process and removal allowance forming in grinding with crossed axes and circular distribution shaft]. *Rezanie i instrument v tekhnologicheskikh sistemakh – Cutting & tool in technological system*, 85, 98–106 [in Ukrainian].
10. Kalchenko, V. V., Sira, N. M., Kalchenko, D. V. (2018). Doslidzhennia protsesu frezeruvannia tsylindrychnykh poverkhon zi skhreshchenymy osiamy instrumenta ta vala [Investigation of the milling cylindrical surfaces process with tool and shaft crossed axes]. *Tekhnichni nauky ta tekhnologii – Technical sciences and technologies*, 4 (14), 18–17 [in Ukrainian].
11. Klimenko, S. A. (2011). Razrabotka PSTM na osnove KNB dlia osnascheniia vyisokoeffektivnykh; rezhushchikh instrumentov [Development of PSTM based on CBN for equipping high-

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

performance cutting tools]. *Rezanie i instrument v texnologicheskikh sistemah – Cutting and tool in technological systems*, 79, 93–101 [in Russian].

12. Klivenko, S. A., Kopeykina, M. Yu., Klivenko, S. An., Manohin, A. S. (2016). Kontsepsiia povysheniia rabotosposobnosti rezhushchikh instrumentov iz polikristallicheskikh kompozitov na osnove kubicheskogo nitrida bora [The concept of improving the performance of cutting tools from polycrystalline composites based on cubic boron nitride]. *Informatsiini tehnologii v osviti, nauksi ta virobnitstvi – Information technology in education, science and production*, 2(13), 108–114 [in Russian].

13. Kalchenko, V. I., Kalchenko, V. V., Sira, N. M. (2016). Modulne 3D-modeliuvannia instrumentiv, procesiv znattia pryusku ta formoutvorennia pry shlifuvanni zi shreshchenymy osiamy tsylindrychnoho ta stupinchastoho vala i elborovoho kruha [Modular 3D-modeling tools, processes of removal allowance and shaping in grinding with crossed axes stepped cylindrical shaft and CBN wheel]. *Rezanie i instrument v tekhnologicheskikh sistemakh – Cutting and tool in technological systems*, 86, 36–48 [in Ukrainian].

14. Kalchenko, V. I., Kalchenko, D. V. (2013). Modulne 3D-modeliuvannia instrumentiv, protsesu znattia pryusku ta formoutvorennia pry shlifuvanni zi skhreshchenymy osiamy stupinchastoho vala i kruha [Modular 3D modeling of tools, process of pull-down and shaping when grinding with crossed axes of a step shaft and a circle]. *Visnyk Chernihivskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu. Seriya «Tekhnichni nauky» – Visnyk of Chernihiv State Technological University. Series "Technical sciences"*, 3 (67), 68–77 [in Ukrainian].

15. Kalchenko, V. I., Pogiba, N. N., Kalchenko, D. V. (2012). Opreddenie sostavliaiushchikh sily rezaniia pri glubinnom shlifovanii poverkhnosti vrashcheniia orientirovannym elborovym krugom [Determining cutting forces components in deep grinding of revolution surfaces oriented el'bor wheel]. *Sverkhverdnye materialy – Journal of Superhard Materials*, 2 (196), 58–73 [in Russian].

16. Kalchenko, V. V., Yeroshenko, A. M., Boyko, S. V. (2017). Determination of cutting forces in grinding with crossed axes of tool and workpiece. *Acta Mechanica et Automatica*, 11, 1 (39), 58–63 [in English].

17. Kalchenko, V. I., Kolohoida, A. V., Kuzhelnyi, Ya. V., Morochko, V. V. (2018). Odnoprokhidne dovodochne shlifuvannia zi skhreshchenymy osiamy kruha ta tsylindrychnoi detali [Singlepass finishing grinding with crossed axes tool and cylindrical part]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, 4 (14), 9–17 [in Ukrainian].

18. Grabchenko, A. I., Kalchenko, V. I., Kalchenko, V. V. (2009). *Shlifovanie so skreshhivayushhimisya osyami instrumenta i detail [Grinding with crossed axes of tool and workpiece]*. Chernigov: ChDTU [in Russian].

19. Reshetov, D. N., Portman, V. T. (1996). *Tochnost metallorzhushchikh stankov [Precision of machine tools]*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].

20. Rodin, P. R. (1977). *Osnovy formoobrazovaniya poverkhnostej rezaniem [Fundamentals of forming surfaces with cutting]*. Kiev: Vyshha shkola [in Russian].

21. Kalchenko, V. I., Pogiba, N. N., Kalchenko, D. V. (2011). Povyshenie proizvoditelnosti i tochnosti shlifovaniia so skreshchivaiushhimisya osiami elborovogo kruga i stupenchatogo valika [Increased productivity and precision of grinding with crossed axes CBN wheel and stepped shaft]. *Rezanie i instrument v tekhnologicheskikh sistemakh – Cutting and tool in technological systems*, 80, 131–140 [in Ukrainian].

UDC 621.914.1

Olena Sliednikova, Volodymyr Vynnyk, Vasyl Sklyar, Olga Aksonova

MODULAR 3D MODELING OF TOOLS, PROCESS OF ADAPTATION REMOVAL AND FORMING AT MILLING THE CAMS WITH CROSSING TOOLS AND DETAILS

Urgency of the research. Ensuring high accuracy and quality of the cams of the camshafts and textile machines while ensuring high processing performance is an important task in mechanical engineering.

Target setting. The high accuracy of the machined surfaces of the cams of the camshafts and textile machines will ensure the correct operation of the nodes and will increase the service life.

Actual scientific researches and issues analysis. In the known methods of milling, when machining cams, the depth of cut is different, the contour feed is uneven, which reduces machining performance and accuracy of the machined part.

Uninvestigated parts of general matters defining. The way of milling cams of camshafts and textile machines oriented tool that provides high accuracy and processing performance is not developed.

The research objective. Development of a new method of milling cams of camshafts and textile machines with intersecting axes of tools and parts, which will provide an increase in the accuracy of machined surfaces and productivity of processing.

The statement of basic materials. A new method of milling cams of camshafts, where the processing is conducted by a cutter, whose height is less than the length of the cam. Milling cams of the camshaft is performed in one set by the cutter with its intersecting axes and parts. When machining cams, stabilization of the stock removal and contour feed is ensured. What improves accuracy and processing performance.

Conclusions. A new method for milling cams of camshafts and textile machines with intersecting axes of tools and parts is proposed. The proposed method of milling curvilinear surfaces on CNC machines can be applied to the milling processes of various cylindrical surfaces of a complex profile with intersecting axes of the tool and part.

Keywords: milling; modular three-dimensional geometric modeling; oriented tool; shaping; camshaft; textile machine cam.
Fig.: 12. **References:** 21.

Следнікова Олена Сергіївна – доцент кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Sliednikova Olena – PhD in Technical Sciences, associated professor of road transport industry and mechanical engineering, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenko Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: sliednikova@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5444-1747>

ResearcherID: N-4430-2015

Винник Володимир Олександрович – аспірант Чернігівського національного технологічного університету (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Vynnyk Volodymyr – PhD student, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenko Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: vowavynnyk7@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4179-5765>

ResearcherID: F-8938-2016

Скляр Василь Михайлович – асистент, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Sklyar Vasyly – assistant, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenko Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: uslhj@meta.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0563-6887>

ResearcherID: J-1138-2016

Аксьонова Ольга Олегівна – асистент, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Aksonova Olga – assistant, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenko Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: itmia@ukr.net

Наталія Сіра, Антоніна Кологойда, Олександр Литвин, Дмитро Кальченко

ВИЗНАЧЕННЯ СИЛ РІЗАННЯ ПРИ ЧИСТОВОМУ ШЛІФУВАННІ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ТА ГОЛЧАСТОЇ ПОВЕРХОНЬ ВАЛИКА ТЕКСТИЛЬНОЇ МАШИНИ

Актуальність теми дослідження. За правильно підібраних режимів обробки голчатої гарнітури виникають задирки на кінчиках голок. У процесі шліфування базових поверхонь текстильних валиків виникають похибки форми циліндричної поверхні. Отже, вивчення процесу шліфування циліндричної та голчатої поверхні барабанів та валиків текстильних машин є актуальним завданням.

Постановка проблеми. На якість вовни після її обробки на текстильних агрегатах впливає геометрична точність базових циліндричних поверхонь барабанів та валиків, а саме їх циліндричність та відсутність хвилястості, а також гострота голок та форма їхньої робочої поверхні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Традиційно використовують два методи визначення сил різання: емпіричний та розрахунково-експериментальний. Запропоновані методика визначення сили різання при глибинному шліфуванні орієнтованим ельборовим кругом, де враховується вплив ріжучих та деформуючих зерен, а також жорсткість оброблюючої системи. Розроблено метод однопрохідного доводочного шліфування гладких циліндричних поверхонь, що забезпечує високу геометричну точність та продуктивність обробки.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Однак не проведено дослідження складових сил різання, що виникають у процесі чистового шліфування циліндричної та голчатої поверхонь барабанів та валиків текстильних машин.

Постановка завдання. Створення загальної модульної 3D моделі поверхонь інструменту та деталі, процесу формоутворення й зняття припуску при шліфуванні циліндричної поверхні текстильного валика. Визначення закономірностей розподілу сил різання вздовж профілю абразивного зерна.

Виклад основного матеріалу. За новим способом однопрохідного доводочного шліфування циліндричної поверхні орієнтованим шліфувальним кругом запропоновані математичні 3D моделі поверхні інструменту та циліндричної поверхні текстильного валика, на базі чого розроблені моделі зняття припуску та формоутворення. Досліджено характер контакту одиничного абразивного зерна з поверхнею деталі. Розроблена модель різання одиничним абразивним зерном у програмі Aбаqus. Визначено закономірності розподілу сил різання вздовж профілю зерна в радіальній та осевій площинах.

Висновки відповідно до статті. Розроблені модульні 3D моделі зняття припуску та формоутворення при чистовому шліфуванні гладкої циліндричної поверхні текстильних валиків. Виявлено розподіл сил різання вздовж профілю зерна в радіальній та осевій площинах.

Ключові слова: текстильні машини; шліфування; орієнтований інструмент; тривимірне моделювання; сили різання.
Рис.: 10. Бібл.: 8.

Актуальність теми дослідження. За правильно підібраних режимів обробки голчатої гарнітури виникають задирки на кінчиках голок. При шліфуванні базових поверхонь текстильних валиків виникають похибки форми циліндричної поверхні. Отже, вивчення процесу шліфування циліндричної та голчатої поверхні барабанів та валиків текстильних машин є актуальним завданням.

Постановка проблеми. Текстильна промисловість широко використовує чесальні агрегати, які здійснюють обробку первинної сировини, вовни, з метою її подальшого використання. Для отримання необхідної чистоти та якості вовни, її пропускають через ряд барабанів та валиків, при цьому вирізняють подаючий та чесальний барабан, а також робочі валики. У будь-якому випадку поверхня барабанів та валиків являє собою голчасту фурнітуру заданої форми. Тип та розміри голок вибирають залежно від стадії обробки та типу матеріалу. На якість отриманої продукції впливає геометрична точність базових циліндричних поверхонь барабанів та валиків, а саме їх циліндричність та відсутність хвилястості, а також гострота голок та форма їхньої робочої поверхні. Отже, вивчення процесу шліфування циліндричної та голчатої поверхні барабанів та валиків текстильних машин є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Традиційно використовують два методи визначення сил різання [1; 2; 3]: емпіричний та розрахунково-експериментальний. Проте перший можна використовувати тільки в умовах обробки близьких до експериментальних, а другий хоча і є більш універсальним, але також потребує вимірювання багатьох параметрів із досить високою точністю, що не завжди можливо. Крім того, ці методи не враховують одночасний вплив параметрів робочої поверхні круга та їх зміну

в процесі обробки, вплив деформуючих зерен, жорсткість обробляючої системи та переривчастість поверхні інструмента.

У роботі [4] запропонована методика визначення сили різання при глибинному шліфуванні орієнтованим ельборовим кругом, де враховується вплив різальних та деформуючих зерен, а також жорсткість обробляючої системи. При цьому товщина зрізаного шару розраховується з умови рівності матеріалу, що підводиться та зрізується.

Запропоновано метод однопрохідного доводочного шліфування [5] гладких циліндричних поверхонь, що забезпечує високу геометричну точність та продуктивність обробки.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Однак не проведено дослідження складових сил різання, що виникають у процесі чистового шліфування циліндричної та голчастої поверхонь барабанів та валиків текстильних машини.

Мета статті. Головною метою роботи є визначення характеру контакту абразивної поверхні шліфувального круга з циліндричною поверхнею текстильного валика. Визначення закономірностей розподілу сил різання вздовж профілю абразивного зерна.

Виклад основного матеріалу. Для створення постійного зазору між барабанами та валиками текстильних машин, перед намотуванням голчастої гарнітури виконують чистове шліфування їхніх циліндричних базових поверхонь. Після закріплення голчастої гарнітури здійснюють її попереднє чорнове вирівнювання та остаточне заточування, для забезпечення циліндричного профілю голчастої поверхні та оптимальної форми робочих кінчиків голок. З метою забезпечення високих характеристик точності та шорсткості, а також постійної мікроструктури поверхневого шару базових гладких циліндричних поверхонь барабанів та валиків текстильних машин пропонується виконувати їх обробку за схемою, описаною в роботі [5]. При цьому основною особливістю процесу шліфування деталей цього типу є значні діаметральні розміри.

Розглянемо чистову обробку гладкої циліндричної поверхні подаючого валика I (рис. 1) текстильного агрегата. Розрахунок будемо проводити для поверхні діаметром 240 мм, як інструмент 2 приймемо абразивний шліфувальний круг I-200×25×32 25A 25 СТ1 7К. Швидкість інструмента 30 м/с, деталі – 30 м/хв. Глибина різання $t = 0,1$ мм.

Згідно з методикою, описаною в роботі [5], з метою максимального завантаження різальної поверхні шліфувального круга 2, та розподілу величини припуску вздовж його периферії повернемо інструмент навколо осі Y_1 , що перпендикулярна до осей обертання круга та деталі I , і яка розташована на відстані $C = 5$ мм від торця інструмента на кут $\beta = 0,333$ рад.

Модульна 3D модель поверхні шліфувального круга 2 для описаної схеми обробки (рис. 1) визначається рівнянням

$$Shk(x, \theta_i) = C^i_{x, \theta_i} = M1(x) \cdot M4(\theta_i) \cdot M2(R_i) \cdot e4, \quad (1)$$

де $C^i_{x, \theta}$ – циліндричний модуль інструментальної поверхні; $M1...M6$ – матриці переміщення та повороту відносно координатних осей X, Y, Z ; $e4$ – одиничний радіус-вектор початку координат; $R_i = 100$ мм – радіус шліфувального круга; $x = 0...B$ – лінійна координата на периферії, змінюється від 0 до значення висоти шліфувального круга $B = 25$ мм; $\theta_i = 0...360^\circ$ – кутова координата профілю інструмента.

Модульна 3D модель текстильного валика визначається перенесенням інструментальної поверхні в систему координат деталі, за рахунок введення матриці переносу $M^{nep} = M2(-y_c)$ та модулів формоутворення $C^\phi_{\theta_d} = M1(\theta_d \cdot p_z) \cdot M4(\theta_d)$ і орієнтації $C^\beta = M5(-\beta) \cdot M1(-B + C)$. Отже, математична 3D модель поверхні деталі описується виразом

$$\begin{aligned} Det(x, \theta_i, \theta_d) &= C^\phi_{\theta_d} \cdot M^{nep} \cdot C^\beta \cdot C^i_{x, \theta_i} \cdot e4 = \\ &= M1(\theta_d \cdot p_z) \cdot M4(\theta_d) \cdot M2(-y_c) \cdot M5(-\beta) \cdot M1(-B + C) \cdot M1(x) \cdot M4(\theta_i) \cdot M2(R_i) \cdot e4, \end{aligned} \quad (2)$$

де $y_c = R_i + R_d$ – відстань між осями інструмента та деталі; C – довжина калібрувальної частини круга; θ_d – кутовий параметр деталі (кут повороту навколо власної осі);

$p_z = \frac{S}{2 \cdot \pi}$ – крок гвинтової лінії подачі; $S = 10$ мм – осьова подача деталі.

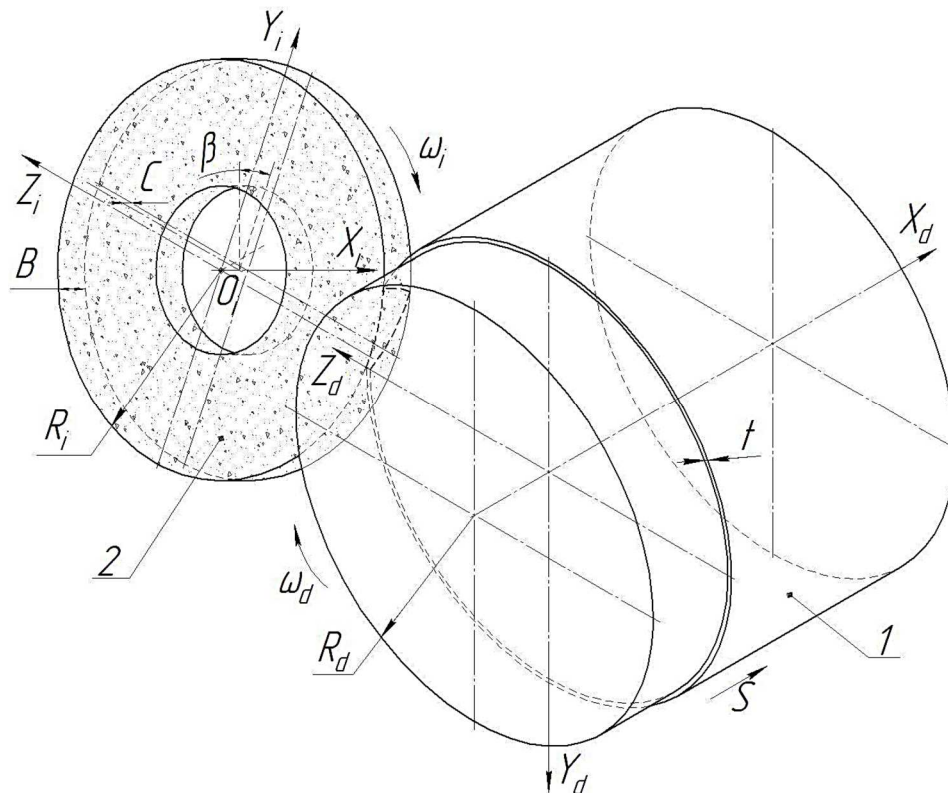


Рис. 1. Схема однопрохідного доводочного шліфування циліндричної поверхні валика текстильної машини

Розглянемо переріз текстильного валика та інструмента в площині, яка перпендикулярна осям обертання круга і деталі та проходить через точку А, яка розташована на відстані C від торця інструмента (рис. 2, а). Розглянемо процес формоутворення циліндричної поверхні валика. Згідно з теорією формоутворення [6] та рис. 2 відносний рух круга та заготовки полягає в обертанні круга навколо осі деталі, тобто в будь-якій точці профілю (т. 1, 2, 3) швидкість відносного руху V перпендикулярна до прямої, що з'єднує центр обертання деталі O_d , та точки, що досліджується. При цьому в довільній точці на профілі круга нормаль N не перпендикулярна до швидкості V , саме тому прийнято вектор відносної швидкості руху круга розкласти на дві складові: тангенційну V_τ , що направлена по дотичній, та нормальну V_n – направлена вздовж радіуса інструмента.

Тангенційна складова швидкості різання $V_{\tau 1}$ (рис. 2) у деякій точці 1 профілю круга викликає його ковзання по собі в межах t . 1, що розглядається, тому цю складову в процесі формоутворення деталі можна не враховувати. Наявність сили V_{n1} зумовлює врізання t . 1 круга в тіло заготовки та зняття матеріалу. Однак, наприклад, у точці 3 (рис. 2, б) нормальна складова швидкості різання V_{n3} направлена до осі обертання круга. У цій точці спостерігається відхід профілю інструмента від заготовки, тобто зняття припуску в цій зоні відсутнє. У деякій точці 2 нормальна складова сили різання V_n дорівнює нулю, тобто t . 2 не буде заглиблюватись ні в поверхню заготовки (зняти при-

пуск), ні в поверхню інструмента (виходити з зони контакту), тобто ця точка є точкою формоутворення і визначає остаточний профіль деталі.

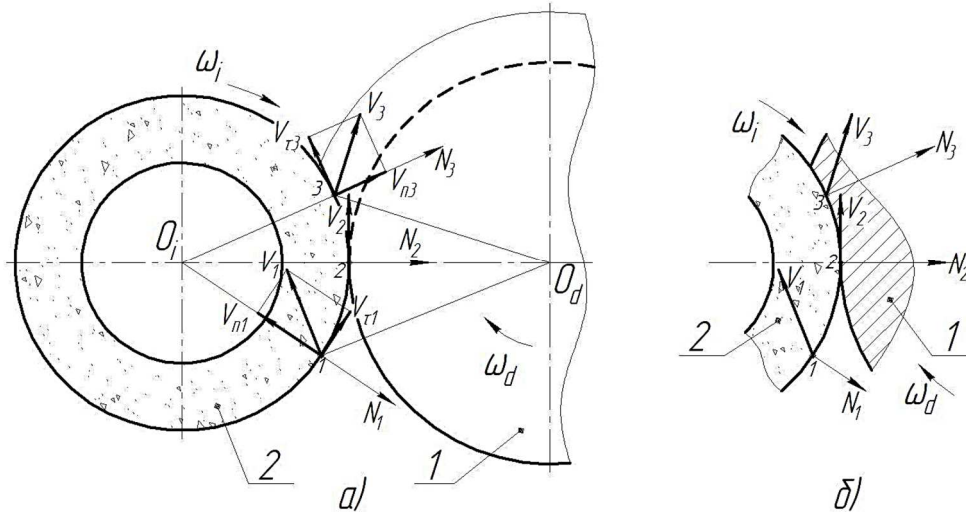


Рис. 2. Схема визначення кута орієнтації інструмента

Визначимо закон розподілу величини нормальної швидкості різання V_n вздовж профілю деталі, при цьому вектор нормалі до поверхні круга визначається як векторний добуток дотичних у цій точці, тобто з 3D моделі профілю деталі маємо

$$N(x, \theta_i, \theta_d) = \frac{\partial \det(x, \theta_i, \theta_d)}{\partial x} \cdot \frac{\partial \det(x, \theta_i, \theta_d)}{\partial \theta_i} \quad (3)$$

Одиничний вектор нормалі

$$n(x, \theta_i, \theta_d) = \frac{N(x, \theta_i, \theta_d)}{\sqrt{N(x, \theta_i, \theta_d)_1^2 + N(x, \theta_i, \theta_d)_2^2 + N(x, \theta_i, \theta_d)_3^2}} \quad (4)$$

Вектор швидкості визначається як похідна по куту повороту деталі

$$V(x, \theta_i, \theta_d) = \frac{\partial \det(x, \theta_i, \theta_d)}{\partial \theta_d} \quad (5)$$

Для знаходження величини добутку $n \cdot V$, у кожній точці осьового перерізу на периферії круга, скористаємось розрахунковим блоком

$$Bk = \begin{cases} \theta \leftarrow 0 \\ \text{for } j \in 0..N \\ x \leftarrow x_{\min} + \frac{x_{\max}}{N} \cdot j \\ Nv \leftarrow \frac{\partial \bar{r}(x, \theta_i, 0)}{\partial x} \cdot \frac{\partial \bar{r}(x, \theta_i, 0)}{\partial \theta_i} \cdot \frac{\partial \bar{r}(x, \theta_i, 0)}{\partial \theta_d} \cdot \omega_d \\ M^{(j+1)} \leftarrow \begin{pmatrix} x \\ Nv \end{pmatrix} \\ M^T, \end{cases} \quad (6)$$

де $x_{\min} = 0$, $x_{\max} = B$ – мінімальна та максимальна координати точок на профілі шліфувального круга; ω_d – частота обертання деталі; N – кількість точок на периферії ін-

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

струмента, які розглядають для визначення нормальної швидкості різання; M – матриця координат точок на периферії круга та відповідних їм значень нормальної швидкості.

За розрахованим набором значень можна побудувати графік зміни проекції швидкості різання на напрямок нормалі (рис. 3).

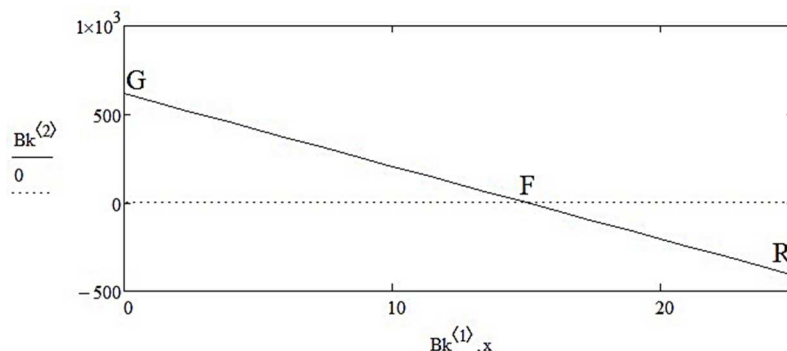


Рис. 3. Графік зміни нормальної швидкості різання вздовж профілю круга

Аналіз рис. 3 показує що найбільше значення добутку $n \cdot V$ належить крайній точці шліфувального круга G , а при русі вздовж профілю інструмента зліва направо нормальна складова швидкості різання зменшується, і дорівнює нулю в деякій точці F , після чого змінює свій напрям із подальшим збільшенням абсолютного значення до досягнення т. R . Тобто ділянка GF здійснює основну роботу зі знімання припуску на деталі. Точка F ($n \cdot V = 0$) є формоутворюючою, і визначає кінцевий профіль деталі. На ділянці FR шліфувальний круг виходить із зони різання, одночасно знімаючи залишковий шар матеріалу.

Кінцевий профіль деталі формується лінією, що проходить через точки з $n \cdot V = 0$, тобто умова, що визначає кінцевий профіль деталі, записується у вигляді

$$\frac{\partial \det(x, \theta, \theta_d)}{\partial x} \cdot \frac{\partial \det(x, \theta, \theta_d)}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \det(x, \theta, \theta_d)}{\partial \theta_d} = 0. \tag{7}$$

Формоутворюючі точки, тобто точки, в яких нормальна швидкість різання дорівнює нулю, на профілі інструмента можна знайти за допомогою розрахункового блоку, аналогічного до (6). Набір цих точок визначає лінію контакту круга з поверхнею деталі. При обертанні її навколо осі деталі отримаємо реальну циліндричну поверхню текстильного валика (рис. 4).



Рис. 4. Математична 3D модель шліфувального круга, деталі та їх лінії контакту

Формоутворення номінального діаметра текстильного валика забезпечують усі точки, які знаходяться на периферії шліфувального круга і розташовані вздовж умовного кола, що відстоїть від торця круга на величину калібруючої ділянки C (рис. 1). Усі інші точки будуть знімати певну частину припуску та викликати появу геометричної шорсткості (рис. 5).

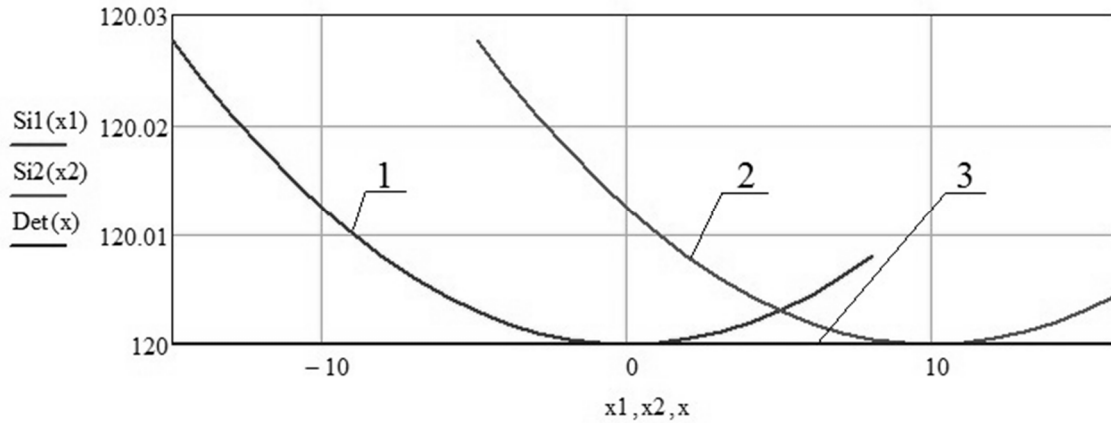


Рис. 5. Формування геометричного профілю деталі:

1, 2 – два суміжних сліди інструмента, 3 – номінальний профіль деталі

Виберемо на колі калібруючої ділянки шліфувального круга 1 (рис. 6, а), деяке зерно 3, та розглянемо процес різання циліндричної поверхні текстильного валика 2 одним абразивним зерном. Значенням осьової подачі знехтуємо. Відповідно до [7] та рис. 6 визначимо довжину риски, яку залишить зерно на поверхні деталі. За схемою обробки, що моделюється, абразивне зерно 3 починає виконувати певну роботу з деформації та різання матеріалу в точці I первинного контакту зерна з поверхнею деталі. Остаточо з зони обробки воно виходить у точці II. Кут входу зерна в тіло деталі в системі координат деталі α_n можна розрахувати за виразом

$$\cos(\alpha_n) = \frac{(R_d + R_i)^2 + (R_d + t)^2 - R_i^2}{2 \cdot (R_d + R_i) \cdot (R_d + t)}, \quad (8)$$

$$\cos(\alpha_{ni}) = \frac{(R_d + R_i)^2 + R_i^2 - (R_d + t)^2}{2 \cdot (R_d + R_i) \cdot R_i}, \quad (9)$$

де α_n, α_{ni} – початковий кут входу зерна в зону різання в системі координат деталі та круга відповідно; R_d – радіус деталі, R_i – радіус інструменту, t – глибина різання.

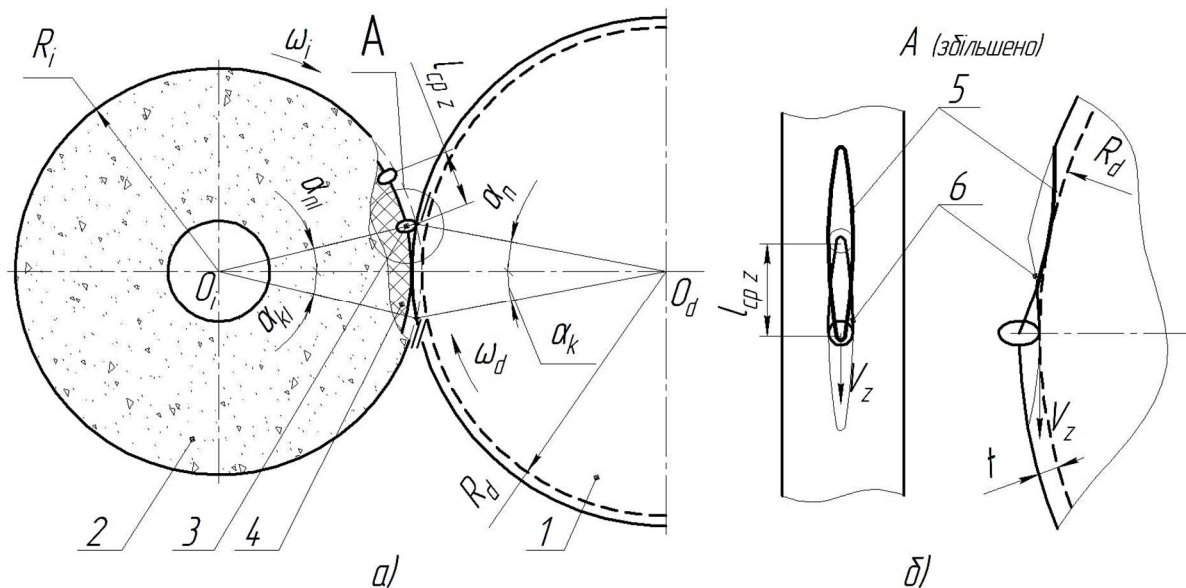


Рис. 6. Схема входу абразивних зерен у зоні обробки:
1 – деталь; 2 – шліфувальний круг; 3 – абразивне зерно; 4 – зв'язка;
5, 6 – лунки на деталі залишені 1-м та 2-м зернами відповідно

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Враховуючи геометрію схеми різання, кут виходу зерна із зони обробки дорівнює куту входу, тобто $\alpha_k = \alpha_n$.

У процесі обробки деталей обертається, за рахунок чого об'єм підведеного в зону різання матеріалу змінюється. Його кількість можна визначити, ввівши додатковий кут

$$\alpha_{\text{доо}} = \alpha_{ni} \cdot \frac{\omega_d}{\omega_i} = \alpha_{ni} \cdot \frac{V_d \cdot R_i}{V_i \cdot R_d}, \quad (10)$$

де ω_d, ω_i – кутова швидкість обертання деталі та інструмента відповідно; V_d, V_i – лінійні швидкості руху точок на профілі деталі та шліфувального круга.

Тоді сумарний кут контакту абразивного зерна з поверхнею валика дорівнює

$$\alpha_{\Sigma} = \alpha_n + \alpha_k + \alpha_{\text{доо}} = 2 \cdot \alpha_n + \alpha_{\text{доо}}. \quad (11)$$

Довжина риски, що залишить зерно на поверхні деталі

$$L_z = (2 \cdot \alpha_n + \alpha_{\text{доо}}) \cdot R_d, \quad (12)$$

де L_z – довжина риски яку залишить одиничне зерно на поверхні деталі.

Для схеми, що розглядається $L_z = 6,647$ мм, при русі зерна по поверхні деталі глибина різання спочатку поступово зростає від 0 до 0,1 мм, а потім знову спадає до 0.

При цьому згідно з [1], процес зняття стружки починається в момент часу, коли значення відношення глибини проникнення вершини зерна z у матеріал заготовки до радіуса заокруглення вершини різальної кромки зерна ρ більше деякого значення. До досягнення цього значення виконується робота з деформації поверхневого шару. Враховуючи велику кількість зерен та їх хаотичне розташування, на поверхні інструменту, з метою визначення закону їх розподілу по зовнішньому контуру інструмента прийнято [1; 2] використовувати теорію ймовірності. У монографії [2] пропонується визначити середню відстань між зернами l_{cpz} (рис. 6) за рівнянням

$$l_{cpz} = \sqrt[3]{\frac{1000}{g \cdot n}} = \sqrt[3]{\frac{100\,000}{(62 - 2 \cdot N) \cdot \rho_n \cdot n}}, \quad (13)$$

де $g = \frac{62 - 2 \cdot N}{100} \cdot \rho_n$ – маса абразивних зерен у 1 см³ об'єму круга; n – кількість зерен у 1 г зерна; N – номер структури шліфувального круга; ρ_n – густина, наприклад, густина електрокорунду $\rho_n = (3,6 \div 3,77) \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Тобто, враховуючи швидкості відносного руху інструмента й деталі та концентрацію зерен по поверхні інструменту, риски, що залишають два поруч розташованих зерна 5, 6 (рис. 6, б), будуть накладатись.

Змоделюємо процес врізного шліфування одиничним абразивним зерном у програмному пакеті Abaqus. Прийнемо глибину різання вздовж траєкторії руху зерна 0,1 мм. Просторова модель схеми обробки побудована засобами програми зображена на рис. 7. У результаті моделювання отримуємо карту навантажень та переміщень для зерна й деталі (рис. 8).

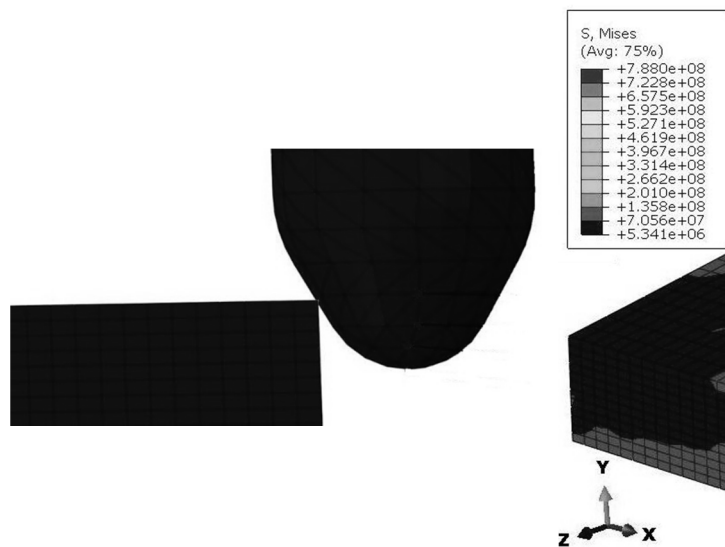


Рис. 7. Модель схеми обробки
одиничним абразивним зерном

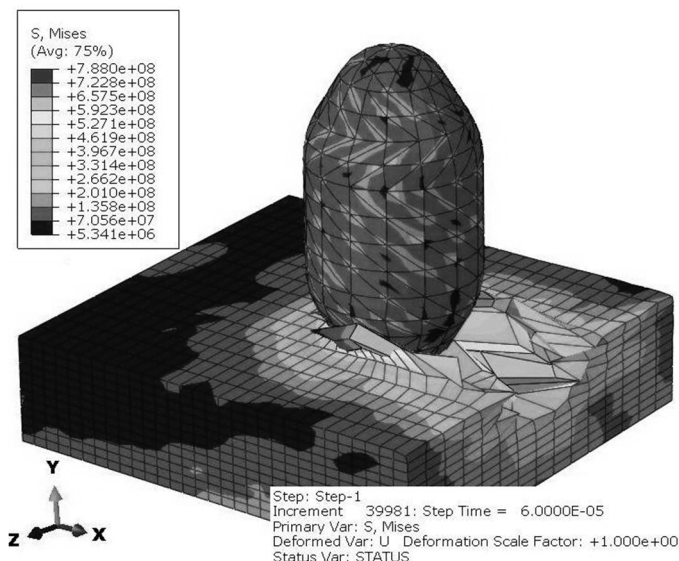


Рис. 8. Результати моделювання
процесу шліфування

За даними розрахунку побудовані епюри навантажень для абразивного зерна в осьовій (рис. 9) та радіальній (рис. 10) площинах, за якими можна визначити закономірність розподілу сил різання вздовж профілю різальної кромки.

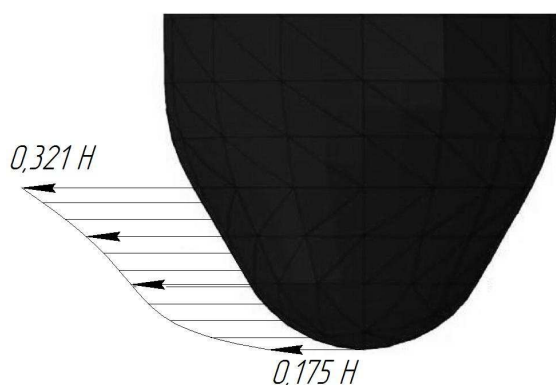


Рис. 9. Епюра навантаження зерна
в осьовій площині

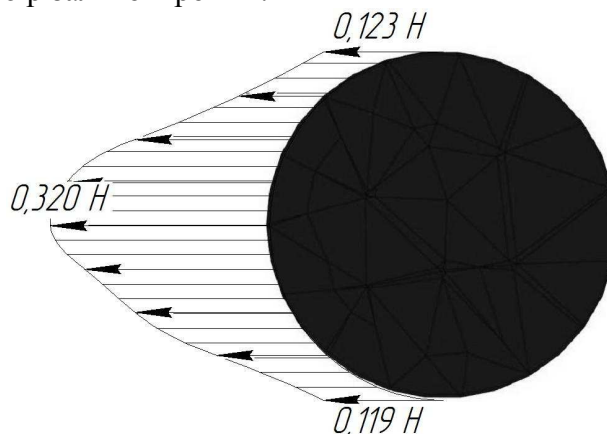


Рис. 10. Епюра навантаження зерна
в радіальній площині

Висновки відповідно до статті. Розроблена модульна 3D модель шліфування гладкої циліндричної поверхні валиків текстильних машин за новим способом. Зменшення теплонапруженості в зоні обробки досягається шляхом розподілу припуску вздовж максимально можливої ділянки периферії шліфувального круга за рахунок введення кута повороту інструменту навколо осі Y_1 . Для заданих умов обробки розраховано довжину лінії контакту одного абразивного зерна з поверхнею деталі, а також показано методику визначення перекриття рисок, які залишаються від сусідніх зерен. Їх наявність також впливає на сили різання, що виникають у процесі обробки.

Розроблена модель різання одиничним абразивним зерном у програмі Abaqus, яка дала можливість визначити закономірність розподілу сил різання вздовж профілю зерна в радіальній та осьовій площинах.

Список використаних джерел

1. Филимонов Л. Н. Высокоскоростное шлифование. Ленинград: Машиностроение, Ленинград. отд-ние, 1979. 248 с.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

2. Маслов Е. Н. Теория шлифования материалов. Москва: Машиностроение, 1974. 320 с.
3. Корчак С. Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. Москва: Машиностроение, 1974. 280 с.
4. Кальченко В. И., Погиба Н. Н., Кальченко Д. В. Определение составляющих силы резания при глубинном шлифовании поверхностей вращения ориентированным эльборовым кругом. *Сверхтвердые материалы: научно-теоретический журнал*. 2012. № 2. С. 58–73.
5. Кальченко В. И., Кологойда А. В., Кужельный Я. В., Морочко В. В. Однопрохідне доводочне шліфування зі схрещеними осями круга та циліндричної деталі. *Технічні науки та технології*. 2018. № 4 (14). С. 9–17.
6. Родин П. Р. Основы формообразования поверхностей резанием. Киев: Вища школа, 1977. 192 с.
7. Кологойда А. В. Визначення силових залежностей при заточуванні голчастої гарнітури. *Технічні науки та технології*. 2016. № 4 (6). С. 70–75.
8. Криворучко Д. В., Залого В. А. Моделирование процессов резания методом конечных элементов: методологические основы: монография / под общей ред. В. А. Залого. Сумы: Университетская книга, 2012. 434 с.

References

1. Filimonov L. N. (1979). *Vysokoskorostnoe shlifovanie [High-speed grinding]*. Leningrad: Mashinostroenie leningradskoe otdelenie [in Russian].
2. Maslov, E. N. (1974). *Teoriia shlyfovaniia materialov [The theory of grinding of materials]*. Moscow: Mashynostroenie [in Russian].
3. Korchak, S. N. (1974). *Proizvoditelnost protcessa shlifovaniia stalnykh detalei [Productivity of the the grinding process of steel parts]*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
4. Kalchenko, V. I., Pogiba, N. N. & Kalchenko, D. V. (2012). Opredelenie sostavliaiushchikh sily rezaniia pri glubinnom shlifovanii poverkhnostei vrashcheniia orientirovannym elborovym krugom [Determination of the components of the cutting force for deep grinding of surfaces of revolution by an oriented elbor wheel]. *Sverkhтвердые материалы – Superhard materials*, 2 (196), 58–73 (in Russian).
5. Kalchenko, V. I., Kolohoida, A. V., Kuzhelnyi, Ya. V. & Morochko, V. V. (2018). Odno-prokhidne dovodochne shlifuvannia zi skhreshchenymy osiamy kruha ta tsylindrychnoi detali [Single pass finishing grinding with crossed axes tool and cylindrical part]. *Tekhnichni nauky ta tekhnologii – Technical sciences and technologies*, 4 (14), 9–17 [in Ukrainian].
6. Rodyn, P. R. (1977). *Osnovyi formoobrazovaniya poverkhnostey rezaniem [Basics of forming surfaces by cutting]*. Kiev: Vyshcha shkola [in Russian].
7. Kolohoida, A. V. (2016). Vyznachennia sylovykh zalezhnostei pry zatochuvanni holchastoi harnitury [Determination of power dependencies when sharpening a needle headset]. *Tekhnichni nauky ta tekhnologii – Technical sciences and technologies*, 4 (6), 84–88 [in Ukrainian].
8. Krivoruchko, D. V., Zaloga, V. A. (Ed.) (2012). *Modelirovanie protsessov rezaniya metodom konechnykh elementov: metodologicheskie osnovyi: monografiya [Modeling of finite element cutting processes: methodological foundations]*. Sumy: Universitetskaia kniga [in Russian].

UDC 621.923.42

*Natalia Sira, Antonina Kolohoida, Oleksandr Lytvyn, Dmytro Kalchenko***DEFINITION OF FORCE CUTTING AT FAIR GRINDING OF CYLINDRICAL AND NEEDLE ROLLER SURFACE OF A TEXTILE MACHINE**

Urgency of the research. With incorrectly selected processing of the needle headset, burrs appear at the tips of the needles. When grinding the base surfaces of the textile rollers, there are errors in the shape of the cylindrical surface. That is, studying the grinding process of the cylindrical and needle surface of the drums and rollers of textile machines is an important task.

Target setting. The quality of wool after its processing on textile aggregates is influenced by the geometric accuracy of the base cylindrical surfaces of the drums and rollers, namely their cylindricity and the absence of waviness. As well as the sharpness of the needles and the shape of their working surface.

Actual scientific researches and issues analysis. Traditionally, two methods of empirical and experimental-experimental determination of cutting forces are used. The proposed methods for determining the cutting force during deep grinding with an oriented Elbor circle, which take into account the influence of cutting and deforming grains, as well as the rigidity of the processing system. A method of single-pass finishing grinding of smooth cylindrical surfaces has been developed that provides high geometrical accuracy and processing performance.

Uninvestigated parts of general matters defining. However, a study was not made of the component cutting forces arising in the process of grinding the cylindrical and needle-like surfaces of the drums and rollers of textile machines.

The research objective. Creating a common modular 3D model of the tool and part surfaces, the process of forming and removing the stock, when grinding the cylindrical surface of the textile roller. Determination of patterns of distribution of cutting forces along the profile of the abrasive grain.

The statement of basic materials. For a new method of single-pass finishing grinding of a cylindrical surface with an oriented circle, the proposed mathematical 3D models of the tool surface and the cylindrical surface of the textile roller, on the basis of which models for removing the allowance and shaping were developed. The nature of the contact of a single abrasive grain with the surface of a part is determined. The developed model of cutting a single abrasive grain in the program Abaqus. The patterns of the distribution of cutting forces along the grain profile in the radial and axial planes are shown.

Conclusions. Developed modular 3D models of stock removal and shaping during fine grinding of the smooth cylindrical surface of textile rollers. The patterns of distribution of cutting forces along the grain profile in the radial and axial planes are revealed.

Keywords: textile machines; grinding; oriented tool; 3D modeling; forces of cutting; roughness.

Fig.: 10. **References:** 8

Сіра Наталія Миколаївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Sira Natalia – PhD in Technical Sciences, Associated Professor of Road Transport Industry and Mechanical Engineering, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenko Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: nnseraya@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3248-0593>

ResearcherID: K-2658-2017

Кологойда Антоніна Вікторівна – старший викладач кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Kolohoida Antonina – senior teacher of road transport industry and mechanical engineering, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenko Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: kolohoida@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1742-2686>

ResearcherID: I-1118-2014

Литвин Олександр Олександрович – аспірант кафедри інформаційних технологій та програмної інженерії, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Lytvyn Olexandr – PhD student of the Department of Information Technologies and Software Engineering, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenko Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: xpower4718@gmail.com

Кальченко Дмитро Володимирович – аспірант, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Kalchenko Dmytro – PhD student, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenko Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: itmia@ukr.net

Сергій Михалків, Анатолій Фалендиш, Владислав Бульба, Андрій Ходаківський

ЗАСТОСУВАННЯ СПЕКТРАЛЬНОГО ЕКСЦЕСУ ДЛЯ ВІБРОДІАГНОСТУВАННЯ ТЯГОВОГО РЕДУКТОРА ЕЛЕКТРОПОЇЗДА

Актуальність теми дослідження. Установлено, що запровадження дієвих вібродіагностичних заходів із вчасного виявлення відмов вузлів тягової зубчастої передачі електропоїздів є актуальним завданням.

Постановка проблеми. Вібродіагностування механічних вузлів електропоїздів вважається ефективною процедурою, яка здатна виділяти імпульсні складові, які періодично повторюються відповідно до обертання пошкоджених частин зубчастого зачеплення або підшипників. Основною проблемою є розробка ефективних методів з усунення завад і встановлення ознак технічного стану підшипників кочення й редукторів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останніми роками розрахунок величини ексцесу посів провідне місце у виділенні слабких періодичних імпульсів, однак нечіткі рекомендації з підвищення точності цих розрахунків потребували удосконалення, що спричинило появу методу спектрального ексцесу, заснованого на залученні фільтрів для відновлення сигналів, що носять випадковий характер і заповнені високим рівнем адитивного стаціонарного шуму.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Недостатньо досліджено виявлення підшипникової складової вібрації і вплив на неї редукторної складової у високочастотному діапазоні.

Постановка завдання. Метою статті є визначення інформативної частотної смуги збудження підшипникової вібрації за допомогою методу спектрального ексцесу.

Виклад основного матеріалу. У статті за допомогою спектрального ексцесу обирається найкраща ширина вікна процедури віконного перетворення Фур'є, що дозволяє виявити найбільший рівень спектрального ексцесу й відшукати відповідний частотний діапазон.

Висновки відповідно до статті. Завдяки фільтру Вінера вдалося виявити широкосмугові структури вібрації тягової зубчастої передачі електропоїзда й зафіксувати частотну смугу з добре вираженою резонансною складовою підшипникової вібрації.

Ключові слова: вібрація; електропоїзд; підшипник; редуктор; спектральний ексцес; частота.

Рис.: 6. Бібл.: 7.

Актуальність теми дослідження. Тягова зубчаста передача (ТЗП) є одним із ключових компонентів на моторвагонному рухомому складі (МВРС). Завдяки ТЗП здійснюється передача тягових, електродинамічних гальмових зусиль від тягового електричного двигуна (ТЕД) до зони контакту поверхні кочення колеса й рейки. Отже, комбінація внутрішніх збуджень ТЗП (помилки виготовлення, жорсткість зубозачеплення, що змінюється із плином часу) та зовнішніх збуджень (порушена геометрія колії, крутні моменти на валу ТЕД) спричиняють неминучу вібрацію ТЗП, прискорюють відмови її елементів і підвищують ймовірність настання аварій [1].

Тому видається актуальним запровадження дієвих вібродіагностичних заходів із вчасного виявлення згаданих відмов.

Постановка проблеми. Вібродіагностування пошкоджень механічних вузлів МВРС вважається ефективною процедурою, яка володіє високим потенціалом до виявлення пошкоджень серед сильних завад, які наповнюють зареєстровану вібраційну реалізацію й суттєво ускладнюють інтерпретацію результатів діагностування в практичних додатках [2].

Загальноприйнятим твердженням є те, що багато пошкоджень в обертальних механічних вузлах на ранніх стадіях розвитку спричиняють появу серій ударів і збуджують певні структурні резонанси. Це стосується пошкоджень у вигляді раковин, тріщин зубчастого зачеплення й підшипників кочення. Вібраційний сигнал наповнений імпульсними складовими, які періодично повторюються відповідно до обертання пошкоджених частин зубчастого зачеплення або підшипників. Запропоновано велику кількість методів із визначення діагностичних ознак завдяки застосуванню специфічної обробки сигналів [3].

Таким чином, основною проблемою є розробка ефективних методів із усунення завад і встановлення ознак технічного стану підшипників кочення й редукторів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останніми роками провідне місце у виділенні слабких періодичних імпульсів обійняв інструментарій обробки сигналів, що заснований на величинах частотної форми вібрації, які отримують із величини ексцесу, який вважають мірою наповнення сигналу імпульсними складовими ще з 1970-х років

[4]. За умови наявного пошкодження в сигналі ексцес набуває високого значення й демонструє майже нульові значення за наявного шуму. Імпульси мають бути відфільтрованими й сильно вираженими про що свідчитиме висока величина відношення сигнал-шум. Шум зазвичай заповнює широкий частотний діапазон і маскує сигнал, що несе діагностичну цінність. Результатом цього є неспроможність ексцесу зафіксувати характерні піки імпульсів, які асоціюються з пошкодженнями і величина ексцесу є трохи вище за нуль [3]. Однак відтоді надавалися лише нечіткі рекомендації з підвищення точності отриманих результатів за допомогою використання фільтрації в певних частотних смугах [5]. Тривалий час велика увага приділялася удосконаленню процедур використання ексцесу, що вплинуло на появу методу спектрального ексцесу, заснованого на залученні фільтрів для відновлення сигналів, що носять випадковий характер і заповнені високим рівнем адитивного стаціонарного шуму, також цей метод можна використовувати разом зі спектральною щільністю потужності.

Виділення недосліджених раніше частин загальної проблеми. Серед поширених методів аналізу частотної форми вібрації для визначення технічного стану елементів підшипників кочення й редукторів питання виявлення підшипникової складової вібрації ТЗП і вплив на неї редукторної складової у високочастотному діапазоні вібрації приділено недостатньо уваги.

Постановка завдання (цілей статті). Метою статті є визначення інформативної частотної смуги збудження підшипникової вібрації за допомогою методу спектрального ексцесу.

Виклад основного матеріалу. Системний підхід до вирішення завдань із вібродіагностування ґрунтується на уявленні про гомогенну систему, що зазнає впливу низки сил збурень, які спричиняють відгуки і полягає в пошуках експериментальних взаємозв'язків між вхідними й вихідними збуреннями. Для реєстрації збурень на виході системи слугують заздалегідь відібрані зони, а вхідні збурення зафіксувати дуже важко, оскільки вони породжуються внутрішніми силами. Поширені складнощі, перед якими постають дослідники, пов'язані з тим, що суміш вібрацій формується за типом згортання, число індивідуальних джерел у цій суміші заледве упізнавано і є дуже великим, зокрема в обертальних машинах. Також зареєстрована вібрація наповнена сильним шумом.

Відомо [6], що зареєстрований сигнал $x(t)$ (рис. 1) містить вібраційні компоненти $p(t)$, що викликані періодичними джерелами внаслідок обертання зубчастого зачеплення й залишкову випадкову складову $r(t)$, яка зі свого боку складається з короткотривалих імпульсних складових $t(t)$, що генеруються обертанням елементів підшипників кочення та кінцевої залишкової складової $r_1(t)$, m/c^2

$$x(t) = p(t) + t(t) + r_1(t). \quad (1)$$

Часова форма сигналу здебільшого не несе інформації з наявних пошкоджень підшипників кочення на початкових і середніх стадіях розвитку, і ексцес набуває невисоких значень унаслідок впливу сильних складових вібрації зубозачеплення. Це викликано тим, що вібрація елементів підшипників кочення занурена в гармоніки частоти зубозачеплення, яка домінує в низькочастотному й середньому частотному діапазоні, однак в області високих частот підшипникова вібрація наповнена випадковими флуктуаціями, які превалюють над гармонічною структурою сигналу [3].

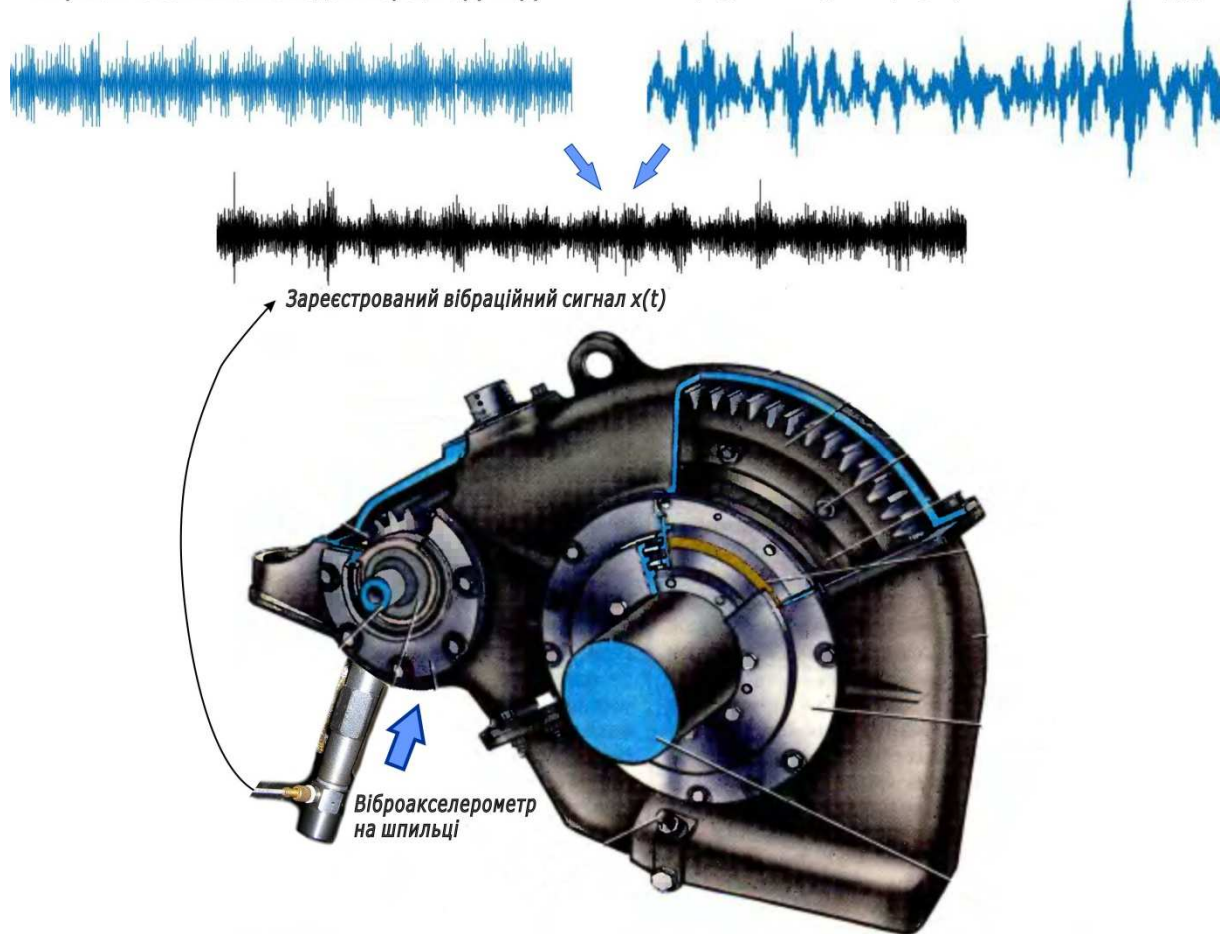


Рис. 1. Вібраційні компоненти зареєстрованої часової реалізації ТЗП електропоїзда EP2T

Вищою результативністю з визначення виду пошкодження підшипників кочення володіє загальнозживаний спектральний аналіз, інтерпретація якого суттєво спрощується, якщо заздалегідь відома частотна смуга найвищого резонансного збудження вібраційних складових, яке ототожнюється з наявними пошкодженнями елементів підшипників і має високий ексцес. Однак вплив випадкових флуктуацій на певних частотах призводить до розмивання резонансних збуджень [7] і широкосмуговий спектр вібрації побудований завдяки швидкому перетворенню Фур'є (ШПФ) надає обмаль діагностичної інформації у високочастотному діапазоні (рис. 2).

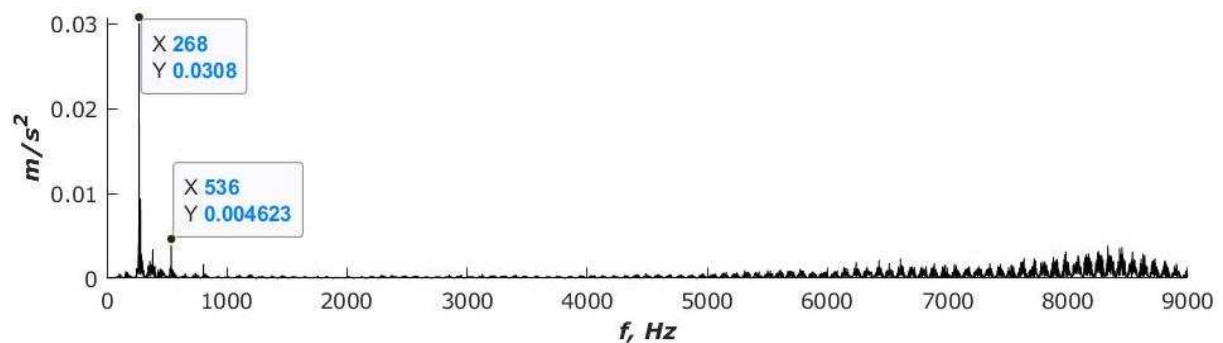


Рис. 2. Широкосмуговий спектр вібрації ТЗП електропоїзда EP2T із пошкодженням підшипником кочення

Отже, завдання з правильного визначення резонансного високочастотного діапазону дозволить виділяти вузькосмуговим фільтром відрізок сигналу в цьому діапазоні для наступного застосування процедури демодуляції.

Експериментальні дослідження здійснювались у моторвагонному депо на випробувальному стенді, куди встановлювався колісно-редукторний блок КРБ електропоїзда ЕР2Т, під час технічного обслуговування якого в стійлі виникли підозри щодо його справності. Колісна пара розкручувалася до частоти 219 об/хв⁻¹. Віб्रोакселерометр для реєстрації вібраційного сигналу має верхній робочий частотний діапазон 9 кГц і вгвинчувався у шпильку й до отвору додавання мастила в опорні підшипники підшипникового вузла ТЗП (рис. 1). Зареєстрований аналоговий вібросигнал у цифровому самописці зазнавав дискретизації частотою 46 кГц.

Для визначення шуканого частотного діапазону залучався метод спектрального ексцесу, який якнайкраще підходить саме для вирішення завдань із виявлення короткотривалих складових серед високого рівня шуму у вібраційних сигналах [3]. Спектральний ексцес є функцією частоти та оцінює міру імпульсивності вібраційного сигналу. Набуває високих значень у частотних смугах, де переважають імпульсні складові, а домінування стаціонарних компонентів спричиняє зниження спектрального ексцесу до нуля.

Ідея використання спектрального ексцесу полягає в його обчисленні у відповідних частотних смугах і вибору тієї смуги до якої потрапить частота з найвищим обчисленим значенням спектрального ексцесу, яку можна вважати місцем розташування наявного пошкодження. Для обчислення спектрального ексцесу запропоновано процедуру віконного перетворення Фур'є (ВПФ)

$$K_Y(f) \approx \left(\frac{f_s}{f_d} \frac{\gamma_{4w}}{N_w} (k_X + 3) - 2 \right) \frac{1}{(1 + \rho(f))^2}, \quad (2)$$

де $f_s = 46$ кГц – частота дискретизації;

f_d – частота повторювання імпульсів, Гц;

$\gamma_{4w} = N_w \sum_n |w(n)|^4 / \left| \sum_n |w(n)|^2 \right|^2$ – нормалізований момент четвертого порядку ви-

падкових змінних;

$w(n)$ – вікно ВПФ;

N_w – ширина вікна ВПФ;

k_X – інтенсивність флуктуацій амплітуд імпульсів;

$\rho(f) = S_N(f) / S_X(f)$ – відношення шум-сигнал;

$S_N(f)$ і $S_X(f)$ – спектральні густини потужності шуму й сигналу з пошкодженням.

Вибір вузького вікна N_w призводить до зростання спектрального ексцесу й начебто є бажаним, однак надмірна вузькість продукує величини спектрального ексцесу з незадовільною спектральною роздільністю, де втрачаються відповідні деталі. Для обрання найкращої ширини вікна ВПФ потрібно провадити декілька обчислень із різною шириною вікна з відповідним аналізом отриманих результатів спектрального ексцесу уздовж усього частотного діапазону.

Для мінімальної ширини вікна $N_w = 32$ відліки спектральний ексцес (рис. 3) набуває вигляду кривої з найменшими піками й локальними сплесками. Натомість ширина вікна з $N_w = 256$ відліками наповнює криву спектрального ексцесу піками, найвищі з яких варто ототожнювати з наявними пошкодженнями й для подальших досліджень вибрати

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

частоту, на якій вони проявляються найкраще, а саме нормалізовану частоту 0,166 або $f = \text{нормалізована частота} \times f_s = 0,166 \times 46000 = 7636$ Гц. Величина розрахованого спектрального ексцесу не є високою (1,83), що спричинено періодичною модуляцією внаслідок обертання вхідного вала.

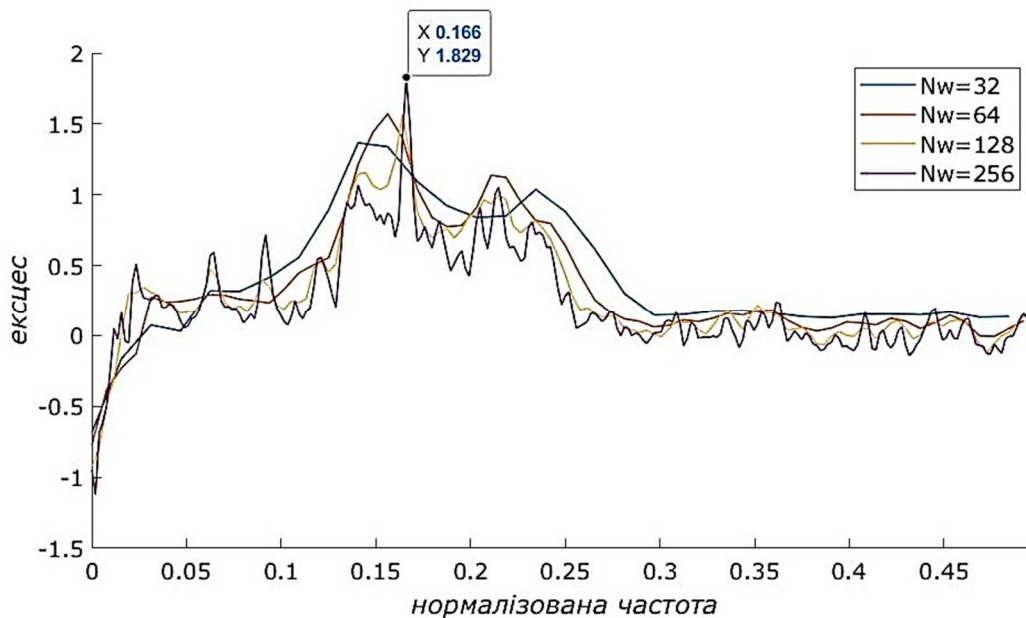


Рис. 3. Величини спектрального ексцесу вібрації ТЗП для різних ширин вікна ВПФ

Спектральний ексцес зростає у високочастотному діапазоні, де джерела вібрації, які викликані динамікою зубчастого зачеплення з найвищим проявом на першій і другій гармоніках частоти зубозачеплення 268 Гц, 536 Гц (рис. 2) вичерпали свою енергію, що призвело до кращого відношення сигнал/шум.

Відновити сигнал $t(t)$ безліччю доступних вузькосмугових фільтрів видається занадто складним завданням, оскільки вони засновані лише на оптимізації певного критерію вібраційного сигналу, тому великий інтерес становить здатність широкосмугової фільтрації відновлювати вібраційний сигнал із максимальним наближенням до сигналу з наявним пошкодженням, проте такі фільтри дуже важко спроектувати. Фільтр Вінера є оптимальним у виявленні широкосмугових структур і намаганні відновити сигнал $t(t)$ серед інших згаданих складових (1) у зареєстрованому вібраційному сигналі (рис. 4) та розраховується взяттям квадратного кореня зі спектрального ексцесу. Подібна фільтрація не здатна відновити справжню форму вібраційного сигналу з короткотривалими імпульсами підшипника кочення, однак спроможна забезпечити покращене відношення сигнал-шум (рис. 5). На побудованому широкосмуговому спектрі вібрації (рис. 6) відфільтрованого сигналу з'являється посилена складова на частоті 7637 Гц у високочастотному діапазоні, що повністю відповідає результатам обчислень спектрального ексцесу і для подальших спектральних побудов дозволяє обрати ширину 1/3-октавного фільтра $B = 6,3 - 8$ кГц, у якій проявлятимуться ознаки пошкоджень підшипників кочення ТЗП.

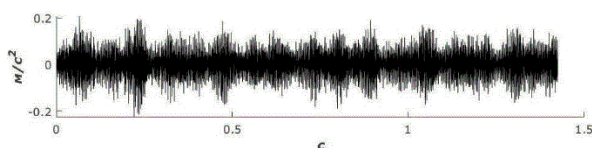


Рис. 4. Вібраційний сигнал ТЗП електропоїзда EP2T

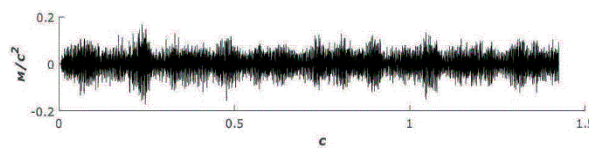


Рис. 5. Вібраційний сигнал ТЗП електропоїзда EP2T після фільтру Вінера

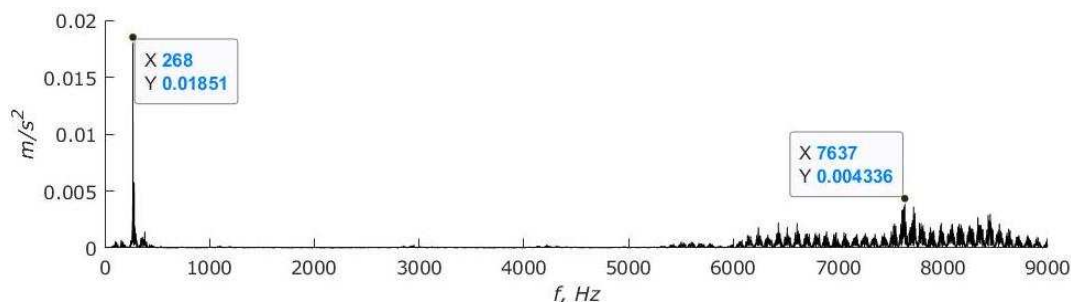


Рис. 6. Широкопasmовий спектр відфільтрованої вібрації ТЗП фільтром Вінера електропоїзда EP2T із пошкодженням підшипником кочення

Висновки відповідно до статті. Установлена цінність спектрального ексцесу розрізняти періодичні й вузькопasmові шумові та імпульсні компоненти вібраційних сигналів і точно знаходити частоту з пошкодженнями підшипників кочення, де найсильніше проявляються імпульсні складові, усуваючи потребу в тривалому періодичному діагностуванні для стеження за динамікою зростання енергетичних складових у відповідних частотних смугах за накопиченими замірами вібрацій.

Виявлена безпорадність цього методу у визначенні виду пошкодження підшипника кочення ТЗП електропоїзда, що обумовлює потребу додаткового залучення процедури перетворення Гілберта для побудови спектрів обвідної вібрації у знайденому частотному діапазоні відфільтрованого сигналу фільтром Вінера.

Список використаних джерел

1. Zhang, T., Chen, Z., Zhai, W., Wang, K. (2019). Establishment and validation of a locomotive-track coupled spatial dynamics model considering dynamic effect of gear transmissions. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 119, 328–345. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.09.032>.
2. Ding, J., Zhao, W., Miao, B., Lin, J. (2018). Adaptive sparse representation based on circular-structure dictionary learning and its application in wheelset-bearing fault detection. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 111, 399–422. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.04.012>.
3. Antoni, J., Randall, R. B. (2006). The spectral kurtosis: application to the vibratory surveillance and diagnostics of rotating machines. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20 (2), 308–331. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2004.09.002>.
4. Dyer, D., Stewart, R. M. (1978). Detection of Rolling Element Bearing Damage by Statistical Vibration Analysis. *Journal of Mechanical Design*, 100(2), 229–235. Retrieved from <https://doi.org/10.1115/1.3453905>.
5. Zhang, H., Chen, X., Du, Z., Yan., R. (2016). Kurtosis based weighted sparse model with convex optimization technique for bearing fault diagnosis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 80, 349–376. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.04.033>.
6. Antoni, J. (2005). Blind separation of vibration components: Principles and demonstrations. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 19(6), 1166–1180. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.08.008>.
7. Randall, R. B. (2005). Applications of spectral kurtosis in machine diagnostics and prognostics. *Key Engineering Materials*, 293-294, 21–32. Retrieved from <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.293-294.21>.

References

1. Zhang, T., Chen, Z., Zhai, W., Wang, K. (2019). Establishment and validation of a locomotive-track coupled spatial dynamics model considering dynamic effect of gear transmissions. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 119, 328–345. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.09.032>.
2. Ding, J., Zhao, W., Miao, B., Lin, J. (2018). Adaptive sparse representation based on circular-structure dictionary learning and its application in wheelset-bearing fault detection. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 111, 399–422. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.04.012>.
3. Antoni, J., Randall, R. B. (2006). The spectral kurtosis: application to the vibratory surveillance and diagnostics of rotating machines. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(2), 308–331. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2004.09.002>.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

4. Dyer, D., Stewart, R. M. (1978). Detection of Rolling Element Bearing Damage by Statistical Vibration Analysis. *Journal of Mechanical Design*, 100(2), 229–235. Retrieved from <https://doi.org/10.1115/1.3453905>.

5. Zhang, H., Chen, X., Du, Z., Yan., R. (2016). Kurtosis based weighted sparse model with convex optimization technique for bearing fault diagnosis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 80, 349–376. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.04.033>.

6. Antoni, J. (2005). Blind separation of vibration components: Principles and demonstrations. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 19(6), 1166–1180. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.08.008>.

7. Randall, R. B. (2005). Applications of spectral kurtosis in machine diagnostics and prognostics. *Key Engineering Materials*, 293-294, 21–32. Retrieved from <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.293-294.21>.

UDC 629.423.2:681.518.54

Serhii Mykhalkiv, Anatoliy Falendysh, Vladyslav Bulba, Andrii Khodakivskiy

APPLICATION OF THE SPECTRAL KURTOSIS FOR THE TRACTION GEARBOX VIBRODIAGNOSTICS OF AN ELECTRIC TRAIN

Urgency of the research. It is established that introduction of effective vibrodiagnostics techniques, which are capable of the early identification of the traction gearbox faults of electric trains, is a relevant task.

Target setting. The vibrodiagnostics of mechanical units of electric trains is known to be a trustworthy technique that is able to extract impulsive components with a periodic repetition in accordance with the revolution of the faulty parts of gears or bearings. The main problem is development of effective methods for the noise elimination and identification of the technical condition features of gears and bearings.

Actual scientific researches and issues analysis. Recently the calculation of the kurtosis index has taken a leading role in the extraction of weak periodic impulses. However, unclear recommendations on increasing the accuracy of these results needed improvement, which led to emergence of the spectral kurtosis method based on the filters for the reconstruction of random signals with a high level of additive stationary noise.

Uninvestigated parts of general matters defining. The identification of a bearing vibration component and the influence of a gear component in high frequency band on it were not clearly understood.

The research objective. The objective of the paper is identification of the informative frequency band of excited bearing vibration by means of the spectral kurtosis method.

The statement of basic materials. The paper selects the best window length of the Short-Time Fourier Transform by means of the spectral kurtosis method, which allows to identify the highest level of the spectral kurtosis and to find the proper frequency band.

Conclusions. By means of Wiener filter, the broadband structures of the traction gearboxes vibration of electric trains were identified, and the frequency band with excited resonance component of the bearing vibration was registered.

Keywords: bearing; frequency; gear; electric train; spectral kurtosis; vibration.

Fig.: 6. References: 7.

Михалків Сергій Васильович – кандидат технічних наук, доцент кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту (майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна).

Mykhalkiv Serhii – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Maintenance and Repair of Rolling Stock, Ukrainian State University of Railway Transport (7 Feuerbach Square, 61050 Kharkiv, Ukraine).

E-mail: svm_m@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0425-6295>

Фалендиш Анатолій Петрович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри теплотехніки та теплових двигунів, Український державний університет залізничного транспорту (майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна).

Falendysh Anatoliy – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Heat engineering and heat engines, Ukrainian State University of Railway Transport (7 Feuerbach Square, 61050 Kharkiv, Ukraine).

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3602-7945>

Scopus Author ID: 57163640900

Булба Владислав Ігорович – інженер, регіональна філія «Південна залізниця» (вул. Є. Котляра, 7, м. Харків, 61052, Україна).

Bulba Vladyslav – engineer of the Regional branch “Southern Railway” (7 E. Kotliar Str., 61052 Kharkiv, Ukraine).

Ходаківський Андрій Миколайович – старший викладач кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту (майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна).

Khodakivskiy Andrii – Senior Lecturer, Department of Maintenance and Repair of Rolling Stock, Ukrainian State University of Railway Transport (7 Feuerbach Square, 61050 Kharkiv, Ukraine).

УДК 629.735.45

DOI: 10.25140/2411-5363-2019-1(15)-80-96

Олег Шаповалов, Денис Колесник, Олег Пилипенко

КОЛИВАЛЬНІ ПРОЦЕСИ В ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧАХ АВІАЦІЙНИХ РЕДУКТОРІВ ТА ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЇХНЬОЇ ВІБРАЦІЙНОЇ МІЦНОСТІ

Актуальність теми дослідження. Редуктори авіаційної техніки зазнають у польоті багаточастотне вібраційне навантаження в результаті численних взаємодій зубчастих коліс різних ступенів із різними швидкостями їх обертання. Зубчасті колеса в експлуатації редукторів, зокрема вертольотів, зазнають багатокомпонентне різночастотне навантаження при основній частоті від обертання колеса в декілька тисяч обертів за хвилину. Існуючі вібрації можуть породжувати коливання дисків зубчастих коліс, що призводить до виникнення багатоциклової втоми і швидкого вичерпання дисками їх довговічності.

Постановка проблеми. Виявлення можливості збільшення ресурсів зубчастих передач, зокрема головного, проміжного і хвостового редукторів вертольотів Ми-8 та їх модифікацій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У розкиданих по різних публікаціях, у тому числі закритих, розрізнених відомостях про вібраційний стан зубчастих передач авіаційних редукторів не приділено належної уваги до комплексного розгляду різних типів коливань, що супроводжують їх експлуатацію, до питань зв'язку між коливальними процесами в редукторах і станом їхніх деталей.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Крутильні, параметричні та згинальні коливання, що невідворотно супроводжують експлуатацію зубчастих передач авіаційних, зокрема, вертольотних редукторів і шляхи підвищення їхньої вібраційної міцності.

Мета статті. Розглянути коливальні процеси в зубчастих передачах авіаційних редукторів та шляхи їх подолання.

Виклад основного матеріалу. Розглянути крутильні, параметричні резонансні та згинальні коливання зубчастих передач редукторів, частоти власних коливань та їх форми, вплив коефіцієнтів перекриття, характеристики вібрацій редуктора та шляхи підвищення їх вібраційної міцності.

Висновок відповідно до статті. Особливо небезпечні підвищені динамічні навантаження в зачепленні, зумовлені резонансними крутильними і параметричними коливаннями зубчастих приводів. Наявний позитивний досвід експлуатації циліндричних і конічних зубчастих коліс свідчить про перспективність застосування розглянутих методів підвищення вібраційної міцності зубчастих передач авіаційних редукторів.

Ключові слова: зубчасті передачі авіаційних редукторів; крутильні; параметричні; згинальні коливання.

Рис.: 11. Табл.: 1. Бібл.: 16.

Актуальність теми дослідження. Редуктори авіаційної техніки зазнають у польоті багаточастотне вібраційне навантаження в результаті численних взаємодій зубчастих коліс різних ступенів із різними швидкостями їх обертання. Зубчасті колеса в експлуатації редукторів, зокрема вертольотів, зазнають багатокомпонентне різночастотне навантаження при основній частоті від обертання колеса в декілька тисяч обертів за хвилину. Наявні вібрації можуть породжувати коливання дисків зубчастих коліс, що призводить до виникнення багатоциклової втоми і швидкого вичерпання дисками їх довговічності.

Постановка проблеми. Виявлення можливості збільшення ресурсів зубчастих передач, зокрема головного, проміжного і хвостового редукторів вертольотів Ми-8 та їх модифікацій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У розкиданих по різних публікаціях, у тому числі закритих, розрізнених відомостях про вібраційний стан зубчастих передач авіаційних редукторів не приділено належної уваги до комплексного розгляду різних типів коливань, що супроводжують їх експлуатацію, до питань зв'язку між коливальними процесами в редукторах і станом їхніх деталей.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Крутильні, параметричні та згинальні коливання, що невідворотно супроводжують експлуатацію зубчастих передач авіаційних, зокрема, вертольотних редукторів і шляхи підвищення їхньої вібраційної міцності.

Мета статті. Розглянути коливальні процеси в зубчастих передачах авіаційних редукторів та шляхи їх подолання.

Виклад основного матеріалу.

Статичні та динамічні цикли навантаження зубців зубчастих коліс. Цикл навантаження зубчастого колеса складається з початкового зростання максимального рівня еквівалентного напруження під час запуску редуктора з накладанням на цей рівень асиметричного навантаження від контакту працюючих зубців колеса. Самі зубці піддаються згину,

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

максимальний рівень яких реалізується в їх основі в западині. Особливість форми циклу навантаження зубців полягає в його несиметричності. Під час моменту входження в контакт пари зубців навантаження різко зростає, а потім поступово знижується до певного рівня, поки не здійсниться його зняття в результаті виходу зубців із зачеплення (рис. 1) [1].

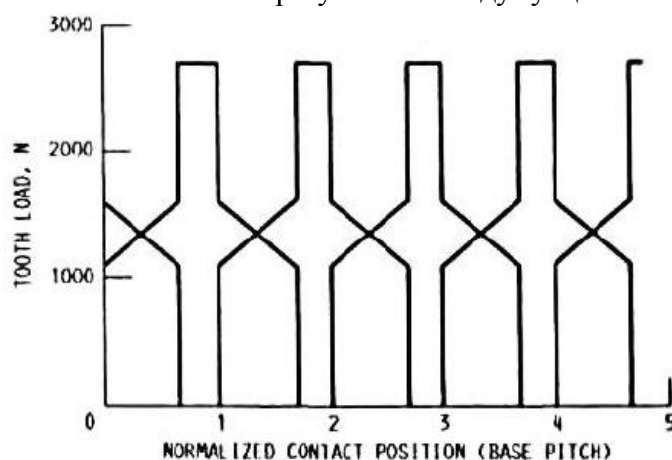


Рис. 1. Цикли навантаження зубців зубчастого колеса

Вказана дія найбільш помітна в моменти чисто ударного навантаження зубців, яке може виникати, зокрема під час зміни режимів роботи редукторів у польоті.

Присутність у зубчастому зачепленні широкого спектра рівнів і частот коливань призводить до того, що поза основною частотою навантаження зуба за кожен оберт колеса може бути реалізоване додаткове його навантаження з різною моделюючою частотою і змінною амплітудою (рис. 2) [1].

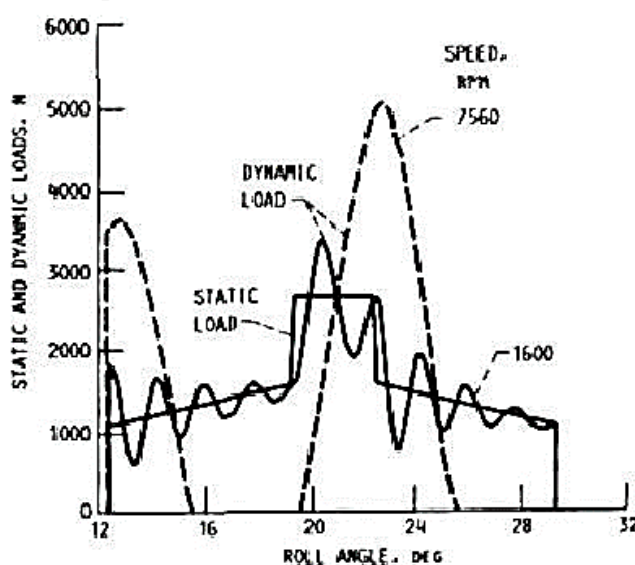


Рис. 2. Динамічні навантаження при різних швидкостях: модуль зачеплення $t = 3,18$ мм; кут тиску $\alpha = 20^{\circ}$; радіус початкового кола $r = 57,1$ мм; прикладене навантаження $F = 2760$ Н

Зубчасті колеса вертольота Ми-8 працюють при частоті 4200 хв⁻¹. Кожен зуб колеса зазнає контакту з двома сусідніми меншими за розміром колесами й тому за один оберт колесо входить 2 рази в контактне зачеплення. У зв'язку з цим частота навантаження кожного зубчастого колеса від одиничного акту навантаження становить 8340 цикл/хв.

Обертання зубчастих коліс головного редуктора вертольота Ми-6 відбувається з частотою обертання 7800 – 8300 хв⁻¹. Кожен зуб входить у зачеплення один раз за оберт

колеса й тому частота накопичення пошкоджень від одиничного циклу навантаження відповідає частоті обертання колеса.

Збудження резонансних згинальних вібрацій коліс викликається динамічними навантаженнями в зубчастому зачепленні, джерелом яких є крутильні коливання зубчастих приводів під час обертання коліс. Особливо небезпечні підвищені динамічні навантаження в зачепленні, зумовлені резонансними крутильними коливаннями зубчастих приводів.

Частоти власних згинальних коливань зубчастих коліс та їх форми. Для визначення резонансних частот обертання зубчастих коліс під час їх згинальних вібрацій необхідно знати частоти власних коливань та їх форми: для циліндричних коліс у радіальному напрямку, для конічних – в осьовому. Можна приблизно розрахувати частоти власних коливань, наприклад, за енергетичним методом Рітца. При цьому неточності визначення тим більше, чим ажурніше і складніше форма колеса [2].

Для циліндричних зубчастих коліс під час коливання обода в радіальному напрямку (як кільця на пружній основі – діафрагмі) власні частоти визначаються за формулою:

$$f_i = \frac{1}{\pi R_0} \sqrt{\frac{Eu^4}{\rho_m(1+\mu)} \frac{v^4(2v-1)^2}{64v^3\xi(u^2+1)+(2v-1)^4u^2}}, \quad (1)$$

де $R_0 = 0,25(d_a + d_f) + 0,5R_2$, м;

d_a і d_f – діаметри вершин і западин зубців колеса;

R_2 – внутрішній радіус обода;

E – модуль поздовжньої пружності;

u – передавальне число;

ρ_m – густина матеріалу колеса;

μ – коефіцієнт Пуассона;

$v = \frac{d_a + d_f + 4R_2}{2(d_a + d_f) - 8R_2}$; ξ – на рис. 3.

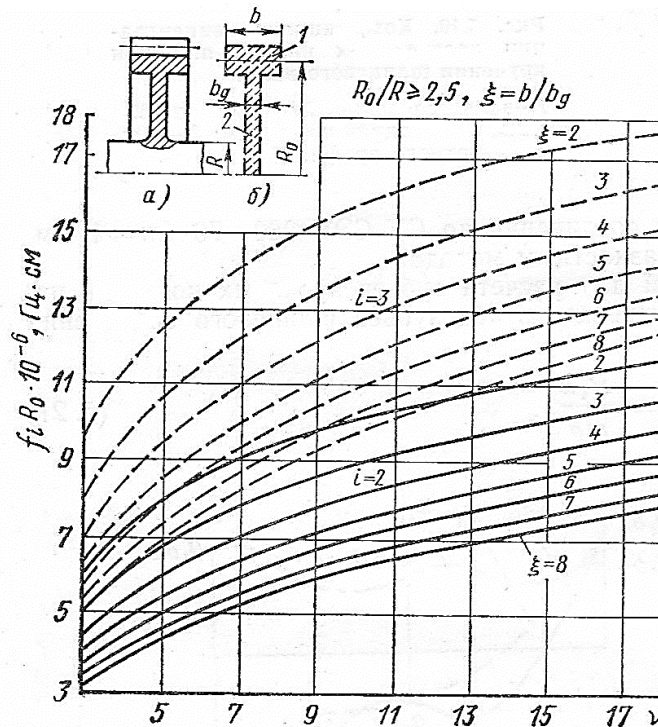


Рис. 3. Власні частоти циліндричного зубчастого колеса: а – циліндричне зубчасте колесо; б – еквівалентне колесо; 1 – обод; 2 – діафрагма

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Знайдені за формулою (1) частоти власних коливань коліс можуть бути використані для попереднього визначення резонансних частот обертання коліс. Точно частоти власних коливань коліс та їх форми визначаються експериментально у вільному їх стані.

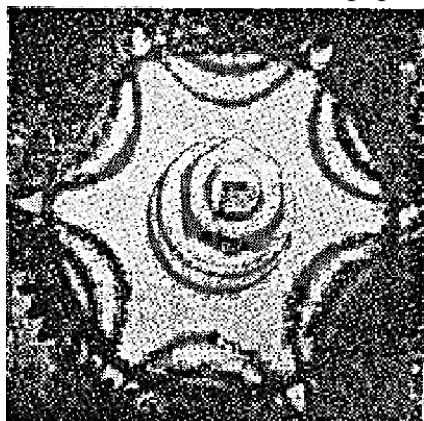


Рис. 4. Форми коливань зубчастого колеса з трьома вузловими діаметрами

Резонують форми коливань із пружними хвилями деформацій (вузловими діаметрами), що розповсюджуються в коловому напрямку по колесу (рис. 4) [2]. Для визначення частот власних коливань сталевих циліндричних зубчастих коліс при коливаннях їх по формах з двома ($i = 2$) і трьома ($i = 3$) вузловими діаметрами приведені графіки на рис. 3.

Крутильні коливання. Існує два види крутильних вібрацій зубчастих приводів – низькочастотні і високочастотні. Низькочастотні вібрації зумовлені коливанням системи ротор двигуна – редуктор – гвинти ТВД (турбо-вентиляторний двигун) або несучий гвинт вертольота; ротор двигуна – коробка приводів агрегатів – агрегати ГТД (газотурбінний двигун). Низькі частоти коливань зазвичай перебувають поза робочим діапазоном згинальних вібрацій коліс і не є небезпечними для обода колеса.

Найбільш небезпечні високочастотні крутильні коливання з частотою зубців і кратною їй гармонікою. Основним джерелом таких коливань є різна жорсткість зубців, що знаходяться в зачепленні [1].

Високочастотні крутильні коливання коліс підсилюються внаслідок циклічних похибок виготовлення зубців і складання коліс, що особливо позначається на роботі конічних коліс. Динамічні навантаження в зубчастому зачепленні, зумовлені крутильними коливаннями коліс, підсилюються поперечними коливаннями їх за наявності податливих валів і опор [1].

Зачеплення зубчастих коліс у редукторах і трансмісіях є джерелами збудження динамічних навантажень і високочастотних вібрацій у всьому механізмі. Під час проектування редукторів транспортного машинобудування в розрахунках зубчастих коліс на міцність відповідно до вимог стандартів ISO 6336 [3], DIN 3990 [4], ГОСТ 21354-87 [5] динамічні навантаження враховуються через коефіцієнт k_v , що залежить від частоти обертання коліс і точності їх виготовлення. Вплив податливості опор, параметрів зачеплення й елементів конструкції редуктора, здебільшого, не враховувалися, а вібрації замикалися звичайно на масивних корпусах редукторів [6].

Сучасна динамічна модель зубчастої пари (рис. 5) повинна враховувати крутильні й поперечні коливання коліс [6].

Система диференціальних рівнянь, що описують ці коливання, має вигляд:

$$\begin{aligned}
 m_1 x_1 + k_1(\omega) x_1 + k_3(\omega) x_3 + C_1 x_1 + C_3(t) x_3 &= -F(t), \\
 m_2 x_2 + k_2(\omega) x_2 - k_3(\omega) x_3 + C_2 x_2 - C_3(t) x_3 &= F(t), \\
 J_1 \varphi_1 + k_3(\omega) R_{01} x_3 + C_3(t) R_{01} x_3 &= M_1 - F(t) R_{01}, \\
 J_2 \varphi_2 - k_3(\omega) R_{02} x_3 - C_3(t) R_{02} x_3 &= -M_2 + F(t) R_{02},
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

де $x_3 = (x_1 + \varphi_1 R_{01}) - (x_2 + \varphi_2 R_{02})$ – деформація зубчастого зачеплення; m_i, J_i – маси і моменти інерції коліс; C_i – жорсткість опор; $C_3(t)$ – змінна з часом жорсткість зачеплення; $F(t)$ – функція силового збудження коливань; $k_i(\omega), k_3(\omega)$ – коефіцієнти демпфірування в опорах коліс і в зачепленні.

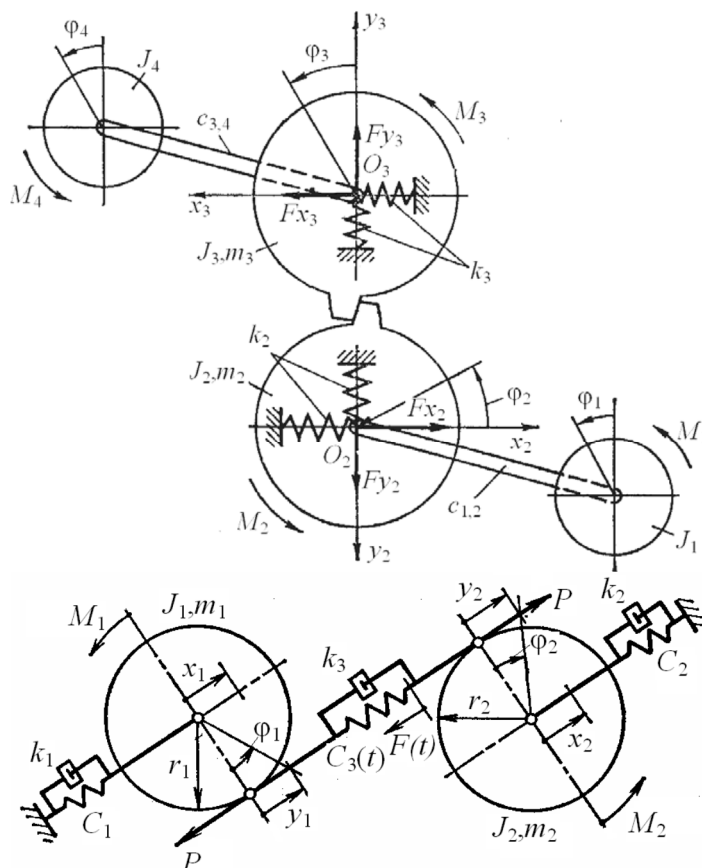


Рис. 5. Динамічна модель пари зубчастих коліс при крутильно-поперечних коливаннях

Отримана за допомогою методу скінченних елементів періодична функція жорсткості зачеплення $k_z(t, M)$ є функцією часу та навантаження і залежить передусім від числа зубців, що знаходяться в зачепленні в цей момент часу [7]:

$$k_z(t) = k_0 + \sum_{n=1}^N k_n \cos(n\omega_z t + \gamma_n), \quad (3)$$

де k_0 – середня постійна жорсткість зачеплення; ω_z – частота переспряження зубців (кількість входів у зачеплення зубців за одиницю часу); γ_n – фазовий кут n -ої гармоніки.

Власну крутильну податливість зубчастої передачі згідно з [8] можна визначити за емпіричною залежністю:

$$e_{пз} = \frac{K_3}{bR_i^2 \cos^2(\alpha + \rho)}, \quad (4)$$

де K_3 – пружна деформація пари зубців під час дії одиничного нормального тиску, що був прикладений до одиниці ширини зуба: для сталевих прямозубих коліс коефіцієнт контактної податливості $K_3 = 6 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{Н}$; для сталевих косозубих коліс $K_3 = 3,6 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{Н}$; для шевронних коліс $K_3 = 4,4 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{Н}$. Згідно [9] податливість зубців коліс лежить у межах $(3,5 - 5) \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{Н}$, що практично збігається з [10].

Параметричні резонансні коливання. Вони є джерелом підвищеного шуму в зубчастих передачах, інтенсивного зношування профілів зубців і т. ін.

Більшість високонавантажених зубчастих передач мають перекриття в зачепленні $1 < \varepsilon_\alpha < 2$, а сумарна жорсткість зубців у зоні двопарного зачеплення приблизно в 1,75 рази вище жорсткості однопарного зачеплення. Вказана особливість у робочих умовах є джерелом збудження параметричних коливань зубчастих коліс, а при деяких

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

умовах – найбільш небезпечних параметричних резонансних коливань. Амплітуда параметричних коливань залежить від точності виготовлення та завантаження коліс робочим моментом і обмежена величиною статичної деформації зубців.

Зниження збуджуваності параметричних коливань зубчастих коліс є важливим завданням як для зниження збуджуваності згинальних вібрацій коліс, так і підвищення надійності і довговічності зубчастих передач загалом.

Канонічна форма однорідного рівняння Мат'є [11] має вигляд:

$$\frac{d^2 f}{dz^2} + (a - 2q \cos 2z) f = 0. \tag{5}$$

Рівняння Мат'є має періодичні рішення, які називають функціями Мат'є тільки в тому випадку, коли параметри a і q пов'язані певною залежністю, яка представляється звичай у вигляді ряду: $a = h^2 + \alpha_1 q + \alpha_2 q^2 + \alpha_3 q^3 + \dots$, де h – ціле число; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ і т. д. – постійні коефіцієнти, що підлягають визначенню; обчислені для різних значень, вони називаються власними значеннями відповідних функцій Мат'є. Існують таблиці парних $se_h(z, q)$ і непарних $se_h(z, q)$ функцій Мат'є і власних значень, що їм відповідають [11]. На рис. 6 представлені характеристичні криві, які показують залежність між q і власними значеннями функцій a_h і b_h . Ці характеристичні криві поділяють площину a, q на ряд областей стійкості. Залежно від того, в яку з областей діаграми стійкості попадає характеристична точка (a, q) системи, вихідне рівняння (5) отримує стійке або нестійке рішення. Области, в яких рішення цього рівняння нестійкі, на діаграмі заштриховані.

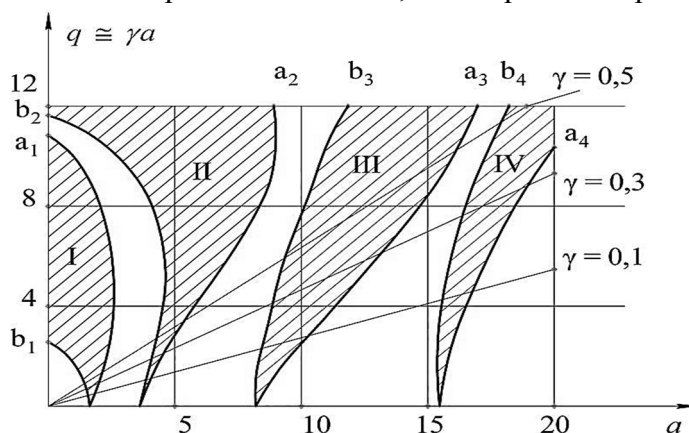


Рис. 6. Діаграма стійкості Айнса-Стретта

Параметр a являє собою квадрат відношення власної частоти коливань до половини частоти збуджуючої сили:

$$a = \left(\frac{\omega_C}{\omega_K} \right)^2. \tag{6}$$

Параметр q характеризує амплітуду коливань, а γ – коефіцієнт модуляції параметра a , що являє собою відношення амплітуди коливань до постійної сили. Для більшості реальних умов γ буде малим у порівнянні з одиницею.

Щоб встановити границі можливих величин параметрів a і q , треба мати в розпорядженні дані про межі зміни як власних частот коливань ω_C , так і частот їх збурення $2\omega_K$.

При $\gamma \ll 1$ характеристичні точки (a, q) системи розташовуються на діаграмі стійкості дуже близько до осі a і практично попадають в області нестійкості, коли $a = (\omega_C / \omega_K)^2 = h^2$, де h – цілі позитивні числа. Отже, параметричні коливання будуть

виникати при співвідношенні власної частоти коливань і частоти збудження $2\omega_k$, що визначається послідовністю:

$$k = \frac{\omega_c}{2\omega_k} = \frac{h}{2} = \frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}, 2, \dots \quad (7)$$

При значеннях $k = 1; 2; 3; \dots$ і т. д., поза нестійкістю, з'являється ще й небезпека резонансу. Зауважимо, що для виникнення параметричного резонансу не обов'язково точне виконання вказаних співвідношень, оскільки параметричний резонанс виникає за більш широкою умовою: переважання позитивної роботи збуджуючої сили над абсолютною величиною її негативної роботи. Резонанс виникає і за наявності сил, які викликають розсіювання механічної енергії, коли це розсіювання не перевищує її позитивного приросту, викликаного дією збуджуючої сили. Найбільш небезпечною щодо стійкості є частота збудження, удвічі більша власної частоти пружної системи, зокрема і тому, що для її збудження потрібно менше енергії, ніж при збудженні більш високих власних форм.

Слід зазначити, що демпфірування дещо скорочує області нестійкості. З цієї причини в реальних системах при невеликих амплітудах збудження з явищем нестійкості стикаються лише в першій області (рідше – у перших двох областях), а наростання амплітуди поперечних коливань при деяких малих значеннях частоти збудження можна пояснити тільки виникненням резонансу (7). Якщо звичайний резонанс виникає при точному збігу частоти власних коливань з частотою збуджуючої сили за відсутності дисипативних сил, то в разі параметричного резонансу існують цілі області частот збуджуючої сили, яким відповідають резонансні явища (рис. 7) [1].

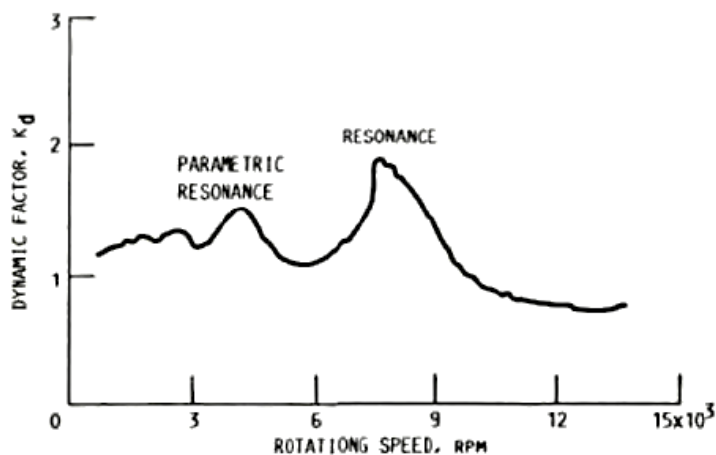


Рис. 7. Динамічний фактор як функція частоти обертання

Джерело: [1].

При звичайному резонансі амплітуда росте прямо пропорційно часу, якщо сили опору відсутні, і залишається обмеженою з часом за їх наявності. На відміну від звичайного резонансу, при параметричному амплітуда коливань може зростати за експоненціальним законом навіть за наявності сил опору. Тому параметричний резонанс є куди небезпечнішим, ніж звичайний.

Отже, параметричні резонансні коливання мають гармоніки збурення

$$k = 0,5; 1; 1,5; 2; \dots$$

від частоти зубців [12], а найбільш сильні з них мають ціле число $k = 1; 2; 3; \dots$

Тут $k = \omega_c/\omega_k$, де $\omega_k = 2\pi n z/60$, s^{-1} ; n – частота обертання колеса, xv^{-1} ; z – число зубців колеса;

$$\omega_c = \sqrt{\frac{c_2}{M} [(2 - \varepsilon_p) + (1 + c_1 / c_2)(\varepsilon_p - 1)]} \quad (8)$$

– середня власна частота крутильних коливань зубчастої передачі, c^{-1} ; c_1 – питома жорсткість одної пари спряжених зубців на початку або в кінці зачеплення, H/m^2 ; c_2 – питома жорсткість пари зубців на початку однопарного зачеплення, H/m^2 ;

$$M = \frac{4J_1J_2}{b(J_1d_{b2}^2 + J_2d_{b1}^2)} \quad (9)$$

– приведена питома маса зубчастих коліс, $кг/м$; J_1, J_2 – моменти інерції коліс, $кг \cdot м^2$; d_{b1}, d_{b2} – діаметри основних кіл коліс, м; b – робоча ширина зубчастого вінця, м; ε_p – повний коефіцієнт перекриття в прямозубих зубчастих передачах з урахуванням деформації зубців під навантаженням, модифікації профілю зубців по висоті і похибок виготовлення. Він дорівнює

$$\varepsilon_p = \varepsilon_\alpha + \frac{\sqrt{2 \frac{\rho_{\alpha 2} \rho_{p1}}{\rho_{\alpha 2} + \rho_{p1}} (\delta - \Delta\alpha_{\alpha 2} - \Delta_0)}}{p_a \operatorname{tg} \alpha_{\alpha 2}} + \frac{\sqrt{2 \frac{\rho_{p2} \rho_{\alpha 1}}{\rho_{p2} + \rho_{\alpha 1}} (\delta - \Delta\alpha_{\alpha 1} - \Delta_0)}}{p_a \operatorname{tg} \alpha_{\alpha 1}}, \quad (10)$$

де ε_α – геометричний коефіцієнт перекриття; $\rho_{p1}, \rho_{\alpha 2}, \rho_{\alpha 1}, \rho_{p2}$ – радіуси кривизни профілів спряжених коліс на початку і в кінці зачеплення відповідно, м; $\delta = q/c_2$ – деформація зубців від робочого питомого навантаження на початку зони однопарного зачеплення, м; q – питома нормальне робоче навантаження на зубчастому колесі, $H/м$; $\Delta_{\alpha 1}, \Delta_{\alpha 2}$ – глибина модифікації головки зуба шестерні і колеса, м; $\Delta_0 = \sqrt{f_{pb1}^2 + f_{pb2}^2}$ – найбільш ймовірна різниця основних кроків зубців спряжених коліс, м; f_{pb1}, f_{pb2} – похибка нормальних кроків шестерні і колеса, м; p_a – крок зачеплення, м; $\alpha_{\alpha 1}, \alpha_{\alpha 2}$ – кути профілів у вершині зуба шестерні і колеса, градуси (знак «плюс» – для зубчастих коліс зовнішнього зачеплення; знак «мінус» – для зубчастих коліс внутрішнього зачеплення).

На рис. 8 представлені області нестійкості однопарного зачеплення залежно від коефіцієнтів перекриття [13].

З графіків видно, що для кожної частоти збудження, починаючи з частоти, кратної власній і нижче, мають місце як зони нестійкості, так і стійкі зони. Число зон нестійкості вдвічі більше ніж число параметра k (7).

Автори роботи [13] відзначають, що при побудові цієї діаграми прийнята незалежність власної частоти пружної системи від коефіцієнта перекриття зачеплення. Але коефіцієнт перекриття може сильно впливати на жорсткість зачеплення, а отже, і на власну частоту пружної системи (табл. 1).

Таким чином, динамікою пружної системи можна керувати за допомогою коефіцієнта перекриття в зачепленні зубчастих коліс, який не залежить від потужності, що передається, тоді як потрібна величина фланку або різнокроковості в зонах двопарного зачеплення для зняття параметричного збудження системи залежить від потужності і пропорційна їй [13].

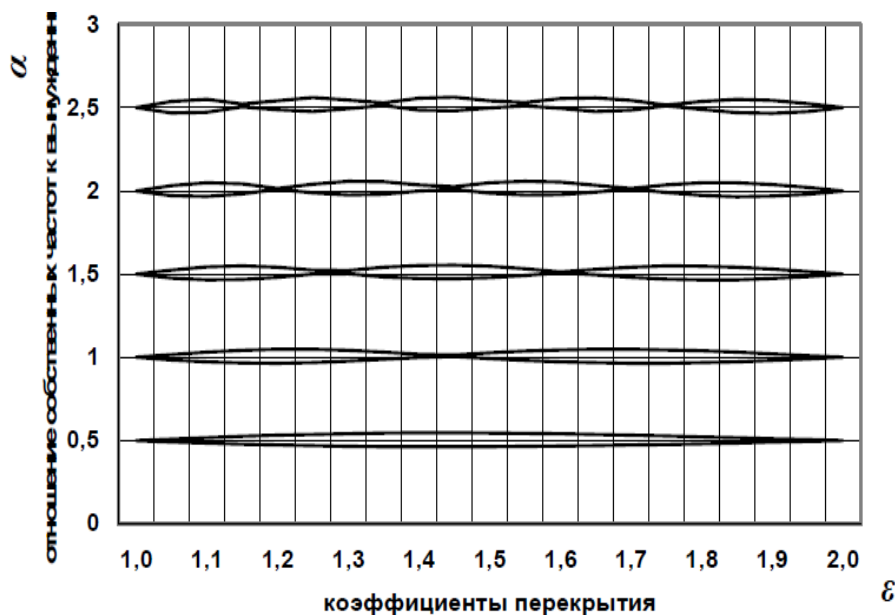


Рис. 8. Области нестійкості зубчастого однопарного зачеплення

Таблица 1

Відношення власних частот до вимушених k

$k = 1$	$k = 1,5$	$k = 2$	$k = 2,5$	$k = 3$
Діапазони коефіцієнтів перекриття				
1,4020...1,4675	1,2510...1,3046	1,1824...1,2259	1,1432...1,1785	1,1178...1,1490
	1,5733...1,6379	1,4013...1,4683	1,3082...1,3701	1,1250...1,3061
		1,6692...1,7258	1,5012...1,5699	1,3998...1,4697
			1,7276...1,7784	1,5772...1,6391
				1,7713...1,8154

Згинальні коливання. Під час збудження коливань зубчастого колеса динамічними навантаженнями від зачеплення зубців у ньому утворюються вперед і назад бігаючі пружні хвилі згинальних деформацій по власних формах. При збігу частоти зачеплення з частотою проходження однієї з цих хвиль настає резонанс згинальних коливань колеса (хв^{-1}):

$$n_p = \frac{60 f_i}{kz \pm i}, \tag{11}$$

де f_i – власна частота згинальних коливань колеса, Гц; $k = 1; 2; 3$; – гармоніки збудження згинальних коливань із частотою зубців; i – число пружних хвиль деформації на колесі (число вузлових діаметрів) під час його коливань по власних формах (знак «плюс» відповідає резонансу з назад біжучою хвилею; знак «мінус» – резонансу з вперед біжучою хвилею).

З виразу (11) слідує, що для однієї власної частоти згинальних коливань зубчастого колеса f_i з i вузловими діаметрами під час його обертання можливі дві резонансні частоти обертання колеса з однією гармонікою збудження. Найбільш небезпечна перша гармоніка збудження з частотою зубців, тому що інтенсивність її вище. Але при низькій точності виготовлення і складання коліс небезпечні й високі гармоніки збудження.

При малому числі kz , тобто коли $kz < i$, можливий другий резонанс із назад біжучою хвилею (хв^{-1}):

$$n_p = \frac{60 f_i}{i - kz}. \tag{12}$$

Під час зовнішнього збудження, не пов'язаного з частотами зачеплення колеса, резонансні частоти обертання колеса будуть дорівнювати (хв^{-1}):

$$n_p = \frac{\pm 60(f_{3\theta} - f_i)}{i}, \quad (13)$$

де $f_{3\theta}$ – зовнішня частота збудження, Гц; знак «плюс» відповідає випадку $f_{3\theta} > f_i$; знак «мінус» – випадку $f_{3\theta} < f_i$.

Можливі згинальні вібрації коліс з одними вузловими колами при коливанні їх по парасольній формі без вузлових діаметрів. Тоді біжучих хвиль деформацій не буде і резонансні частоти обертання колеса (у хв^{-1}) визначаються за (11) з умови $i = 0$:

$$n_p = \frac{60f_i}{kz}, \quad (14)$$

де f_i – власна частота згинальних коливань колеса без вузлових діаметрів з i вузловими колами, Гц.

У зубчастому зачепленні, крім динамічних сил, що виникають під час переспряження зубців коліс, є завжди робоча статична сила, яка збуджує назад біжучу хвилю деформації колеса. Якщо швидкість збудженої хвилі деформації дорівнює швидкості назад біжучої хвилі деформації по власній формі з i вузловими діаметрами, то настає критичний стан колеса. У цьому випадку

$kz = 0$, і критична частота обертання колеса

$$n_{kp} = \frac{60f_i}{i}. \quad (15)$$

Зазвичай зубчасті колеса є жорсткими, і критичні частоти їх обертання не є небезпечними, тому що вони знаходяться значно вище робочих частот обертання колеса.

Іноді згинальні вібрації зубчастих коліс збуджуються динамічними навантаженнями в зачепленні від низькочастотних крутильних коливань передач, зумовлених наявністю підвищених кінематичних похибок у зачепленні передачі з причини незадовільної якості виготовлення і складання коліс. У цьому випадку згинальні вібрації коліс збуджуються низькими частотами, що відповідають гармонікам, кратним частотам обертання коліс. Такі вібрації не є небезпечними, оскільки вони зазвичай мають нерезонансний характер.

На рис. 9 представлена резонансна діаграма [2], яка дає наочне уявлення про границю існування резонансних частот обертання колеса. По осі абсцис відкладені частоти обертання колеса, по осі ординат – частота його коливань. Від початку координат будуються промені, що являють собою геометричне місце частот, що відповідають гармонікам $kz \pm i$ частоти обертання колеса. Для колеса з числом зубців z для кожної форми коливань i та гармоніки зубців k будуються два промені, що відповідають вперед і назад біжучим збудженим хвилям деформацій. Резонансні частоти обертання колеса на діаграмі визначаються перетином лінії власних частот f_i і відповідних променів гармонік збудження.

Побудовані графіки дуже зручні під час дослідження зон резонансних частот обертання колеса, а також під час дослідження можливості відлагодження коливань колеса від резонансних частот і є результатом досліджень та розрахунків вібрацій зубчастих коліс.

Шляхи підвищення вібраційної міцності. Збільшення вібраційної міцності зубчастих коліс є однією з проблем підвищення надійності їхньої роботи, особливе значення це має для авіаційних зубчастих коліс у зв'язку з продовженням ресурсу їхньої роботи. Проблема ускладнюється тим, що зубчасті колеса при високих напруженості та швидкості обертання мають малу масу і складну конструкцію. Збільшення вібраційної міцності здебільшого дає паралельно і збільшення надійності та довговічності роботи зубчастих коліс.

Відлагодження власних частот згинальних коливань коліс від небезпечних резонансних частот обертання здійснюється на практиці, але це не завжди можливо, оскільки густий спектр резонансних частот не дозволяє вийти їм за зону робочих частот.

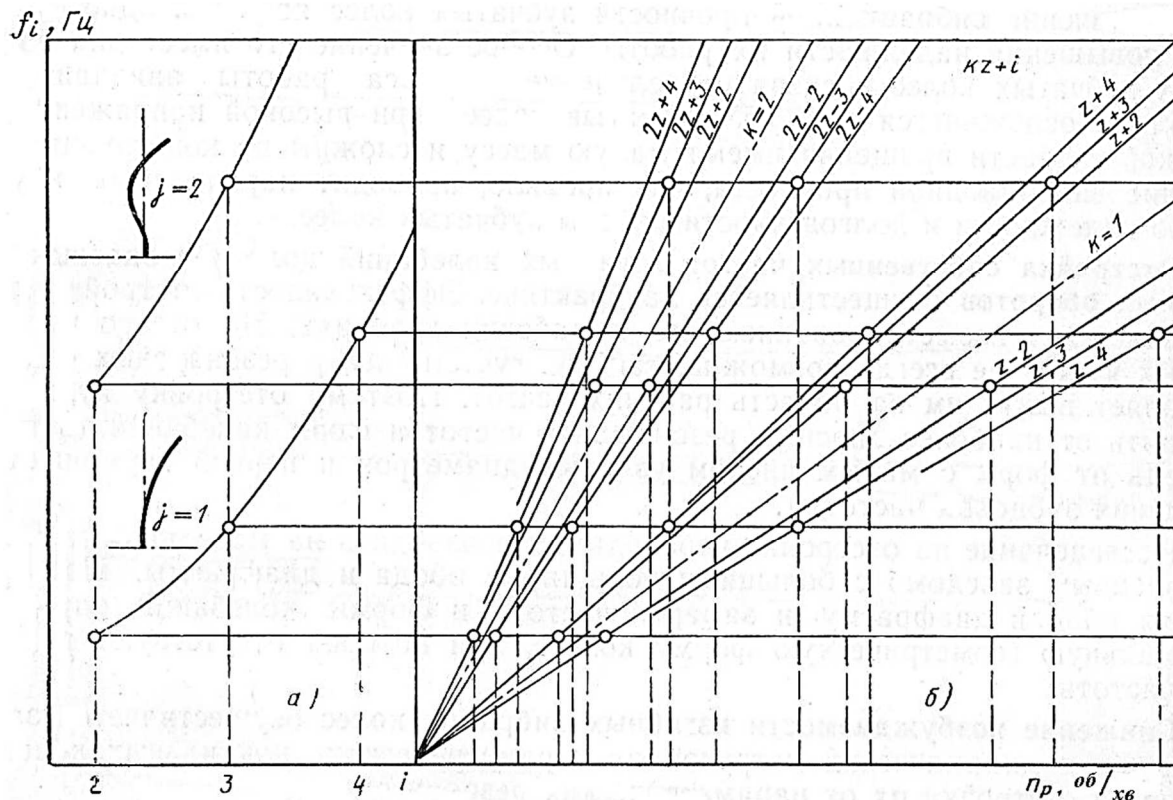


Рис. 9. Резонансна діаграма

Тому відлагодження необхідно проводити від найбільш небезпечних резонансних частот і форм коливань (передусім від форм із малим числом вузлових діаметрів і першої гармоніки збудження частоти зубців).

Дослідження відлагодження проводяться на модельному колесі [2], виготовленому з завідомо більшими товщинами обода і діафрагми. Поступово стоншуючи обід і діафрагму та заміряючи частоти і форми коливань, визначають оптимальну геометричну форму колеса, за якою відсутні резонансні частоти.

Зниження збуджуваності згинальних вібрацій коліс здійснюється за рахунок зменшення динамічних навантажень від параметричних крутильних коливань передач і відлагодження їх від параметричних резонансів.

З (7) видно, що при великій частоті зачеплення, коли $k < 0,5$, параметричні коливання передач відсутні і динамічні навантаження нижче, ніж у нерезонансній зоні при $k > 0,5$. У цьому випадку треба виконати умову $\omega_k > 2\omega_c$, тобто необхідно збільшити частоту зачеплення ω_k за рахунок збільшення чисел зубців колеса і зменшення при цьому модуля зачеплення.

Інший напрямок відлагодження від параметричних коливань – зниження власної частоти крутильних коливань за рахунок збільшення маси коліс або зменшення крутильної жорсткості зубчастих передач. Збільшення мас коліс неприйнятно для авіаційних зубчастих передач. Зменшення крутильної жорсткості коліс – амортизація – конструктивно складна, але за досвідом доцільна [15]. Амортизація здійснюється шляхом розділення обода й діафрагми колеса та введення податливого елемента між ними, наприклад, пружних втулок. При цьому геометричне положення зубчастого вінця відносно осі обертання колеса не порушується, а рівномірність роботи зубця по його довжині збільшується.

Зниження збуджуваності згинальних вібрацій коліс досягається також виготовленням їх з несиметричним ободом. Зменшення амплітуди згинальних вібрацій колеса здійснюється за рахунок його асиметрії.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

За наявності асиметрії в колесі мають місце дві ортогональні форми коливань з однаковим числом хвиль, зміщених по колу на кут $\pi/2i$, які жорстко «прив'язані» до колеса і відрізняються за частотами. Під час обертання колеса в робочих умовах на цих частотах резонанс відсутній, оскільки не виникає біжучих хвиль деформацій з власними формами. У цьому випадку резонують біжучі хвилі із середніми частотами цих форм, але з меншою амплітудою.

Демпфірування згинальних вібрацій коліс – широковідомий спосіб зменшення резонансних напружень. Часткове демпфірування в зубчастих колесах здійснюється за рахунок розсіювання енергії коливань усередині матеріалу колеса, передачі енергії коливань у зовнішнє середовище і втрат енергії під час тертя в контактні зачеплення зі спряженим колесом, у стиках і місцях посадок коліс. Для зниження вібрацій використовують додатковий пристрій – демпфер. Враховуючи досвід застосування демпферів у машинобудуванні, необхідно зауважити, що він обмежений внаслідок конструктивної складності демпфера й ненадійності його роботи [2].

Зменшення динамічних сил у зубчастому зачепленні здійснюється за рахунок зниження збуджуваності параметричних крутильних коливань модифікацією профіля зуба за висотою. У цьому випадку різна жорсткість однопарного і двопарного зачеплень здійснюється за рахунок умовного вирівнювання жорсткостей шляхом модифікації головки зуба спряжених коліс.

Вплив якості складання конічних зубчастих передач на їх віброактивність показаний у [14]. Наприклад, зміщення одного колеса збільшило різницю в кроках спряжених коліс на 0,04 мм і призвело до збільшення вібрацій їх у 8 разів.

Слід мати на увазі, що надмірна модифікація за висотою зуба може призвести до оберненого ефекту – підвищення динамічного навантаження, а перевищення по глибині – до зменшення перекриття в зачепленні, що також підвищуватиме віброактивність передачі. Під час модифікації голівки зуба вирішуються й інші важливі проблеми – збільшення надійності й довговічності роботи зубчастих коліс. При вході зубців у зачеплення покращується утворення масляної плівки, внаслідок чого підвищується протизадирна стійкість, контактна міцність тощо [2].

Зменшення збуджуваності крутильних і згинальних вібрацій коліс відбувається за рахунок збільшення коефіцієнта перекриття в зачепленні. З рис. 8 видно, що при перекритті в зачепленні, який дорівнює цілому числу, параметричні крутильні коливання не збуджуються і зменшується збуджуваність згинальних вібрацій коліс.

Практичне застосування передач з перекриттям в зачепленні $\varepsilon_\alpha \geq 2$ здійснюється модифікацією вихідного контуру за висотою зуба з $\alpha = 20^\circ$ і 18° . Наявний позитивний досвід роботи таких прямозубих коліс, як циліндричних, так і конічних, свідчить про перспективність їх застосування. Такого ж ефекту можна досягти, застосовуючи косо-зубі або з круговими зубцями передачі. Підвищення перекриття зачеплення до $\varepsilon_\alpha = 2$ веде до підвищення згинальної та контактної міцності.

Висота і глибина модифікації профіля вибираються конструктивно за досвідом експлуатації з умови плавного входу в зачеплення зубців з метою утворення масляної плівки.

Збільшення кінематичної та циклічної точності виготовлення і складання коліс є ефективним способом зменшення збуджуваності вібрацій передачі, що має особливе значення для конічних коліс. Складання їх виконують за калібрами з метою суміщення вершин ділільних конусів коліс. Для отримання необхідних плям контакту і зазора в зачепленні допускається зміщення обох коліс до центру передачі на величини, пропорційні числам зубців. Цим забезпечується робота коліс із рівними модулями (кроками) зачеплення.

Характеристика вібрацій редуктора. Вібрації авіаційного редуктора значної інтенсивності мають механічне походження і проявляються у широкому діапазоні частот. Джерелами цих вібрацій є обертові елементи кінематичного ланцюга редуктора. Спектр вібрацій містить велике число дискретних складових і значною мірою визначається спектром похибок обертання елементів кінематичного ланцюга.

На рис. 10 показаний типовий спектр вібрацій вертольотного редуктора [2]. У його спектрі можна виділити роторні вібрації з частотою f_n і вібрації, збуджувані підшипниками та зубчастими колесами з частотою f_z .

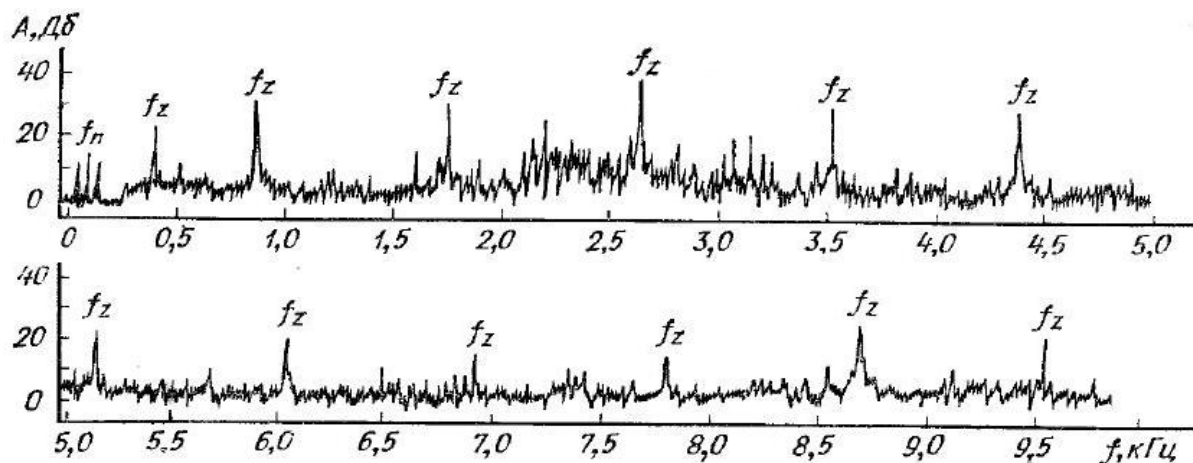


Рис. 10. Спектр вібрацій вертольотного редуктора

Роторні вібрації збуджуються в редукторі в результаті дисбалансів валів, підшипників і зубчастих коліс. Причиною цього є неоднорідність матеріалу, похибки геометрії, дефекти конструкції та монтажу, нерівномірність зношування деталей і послаблення їх спряжень у процесі експлуатації.

Зміна стану зубчастих передач великою мірою відбивається на зміні як роторних гармонік f_n і nf_n , так і гармонік з частотою зачеплення f_z і nf_z , а також комбінованих частот $f = f_z \pm nf_n$. Результати стежачого аналізу першої і другої гармонік від переспряження зубчастих коліс $z_1 = 22$, $z_2 = 41$ показує, що зношування робочих поверхонь викликає швидке зростання рівня вібрацій на частоті f_z і менш інтенсивне – на частоті $2f_z$. При виникненні заїдань, одночасно зі зростанням вібрацій на частоті f_z , що триває, відбувається пришвидшене зростання інтенсивності складової $2f_z$.

Максимуми в спектрі роторних вібрацій проявляються на частотах, що збігаються з частотами власних коливань зубчастих коліс, які можуть бути визначені за такими залежностями [16]:

$$f \approx 3,54 \cdot 10^4 \frac{\sqrt{1+u^2}}{d_2}; \quad f' \approx 1,27f, \quad (16)$$

де u – передаточне число; d_2 – діаметр початкового кола коліс.

Дискретні частотні складові роторних вібрацій визначаються виразом:

$$f_n = \frac{mn}{60}, \quad (17)$$

де $m = 1, 2, 3, \dots, n$ – частота обертання, хв^{-1} .

Причинами виникнення вібрацій, збуджуваних у редукторі зубчастими передачами, є нерівномірність обертових мас, імпульсне, параметричне й кінематичне збудження. Імпульсне збудження відбувається від співудару зубців при вході і виході із зачеплення. У результаті імпульсного збудження в спектрі вібрацій редуктора присутні дис-

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

кретні складові з частотою переспряження зубців і кратні їм гармоніки. В спектрах вертольотних редукторів може бути більше десяти гармонік значного рівня, кратних частоті зубців. Частоти переспряжень зубців для різних типів передач, застосовуваних у вертольотних редукторах, можуть бути визначені з залежностей (18.19)–(18.30), наведених у табл. 18.1 роботи [2]. Параметричне збудження зумовлене змінною жорсткістю зубців у зачепленні (рис. 11) [1].

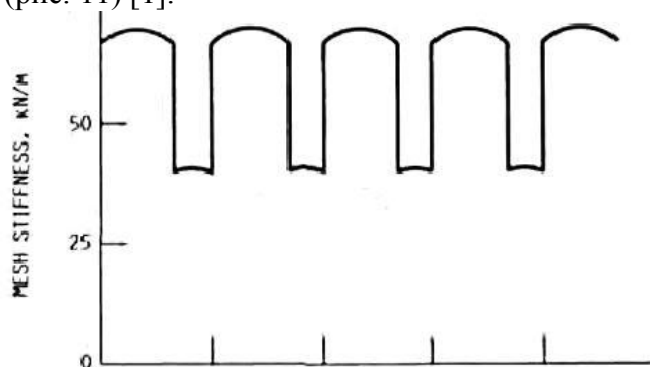


Рис. 11. Жорсткості зубців у зачепленні

Найбільш важливе кінематичне збудження виникає в результаті нерівномірності обертання ланок кінематичного ланцюга редуктора, викликаного похибками обертання. Нерівномірність обертання викликає зміну в часі діючих сил і моментів, і, як результат, виникнення вібрацій. У результаті кінематичного збудження в спектрі вібрацій вертольотного редуктора присутні дискретні складові, що відповідають гармонічним складовим спектрів похибок усіх зубчастих передач цього редуктора. У спектрі вібрацій редуктора можуть бути присутні також вібрації з максимумами, що відповідають власним частотам зубчастих коліс. Крім цього, у спектрі присутні випадкові широкополосні вібрації, викликані випадковими складовими похибок обертання.

Корпус редуктора внаслідок його резонансних властивостей може підсилювати або послаблювати збуджувані вібрації. Інтенсивність складових спектра вібрацій редуктора зростає з ростом частоти обертання та навантаження і залежить від стану його деталей.

Процес вібрацій, збуджуваних у редукторі, можна представити у вигляді суми вузькополосних компонент, пов'язаних певними співвідношеннями з частотами обертання елементів кінематичного ланцюга, і широкополосної шумової складової. Вузькополосні компоненти в діапазоні $1 \dots 3 \cdot 10^3$ Гц можуть досягати рівня до 200 g.

Вібрації в редукторі розповсюджуються від джерел збудження по кінематичному ланцюгу через всі опорні зв'язки на корпус редуктора, де можуть бути виміряні первинним віброперетворювачем, здатним перетворити вібраційний сигнал в електричний. Для виділення із сигналу загальних вібрацій частотних компонент, що несуть інформацію про стан елементів кінематичного ланцюга редуктора, здійснюється його спектральний аналіз.

Зв'язок вібрацій редуктора зі станом його деталей. Нині значне поширення отримали дослідження зв'язку між станом деталей редуктора та його віброакустичними характеристиками. Ці дослідження дають можливість підвищити ефективність вібраційного контролю і в результаті – надійність авіаційних редукторів. Зміна стану елементів кінематичного ланцюга викликає зміну нерівномірності їх обертання, спектра сигналу, пропорційного цій нерівномірності, і спектра вібрацій корпусу редуктора. Наприклад, збільшення дисбалансу обертових мас викликає збільшення роторних вібрацій і особливо найбільш інтенсивної першої гармоніки. Інтенсивність роторних гармонік значною мірою залежить від того, наскільки положення режиму роботи віддалене від резонансного.

Висновки відповідно до статті. Редуктори авіаційної техніки, зокрема вертольотів, зазнають у польоті багаточастотне вібраційне навантаження в результаті багаточисель-

них взаємодій зубчастих коліс різних ступенів з різними швидкостями їх обертання. Існуючі вібрації можуть породжувати коливання дисків коліс, що призводить до виникнення багатоциклової втоми і швидкого вичерпання дисками їх довговічності.

Присутність у зубчастому зачепленні широкого спектру рівнів і частот коливань призводить до того, що поза основною частотою навантаження зуба за кожен оберт колеса може бути реалізоване додаткове його навантаження з різною моделюючою частотою і змінною амплітудою.

Збудження резонансних згинальних вібрацій коліс викликається динамічними навантаженнями в зубчастому зачепленні, джерелом яких є крутильні коливання зубчастих приводів під час обертання коліс. Особливо небезпечні підвищені динамічні навантаження в зачепленні, зумовлені резонансними крутильними і параметричними коливаннями зубчастих приводів. Існуючий позитивний досвід експлуатації циліндричних і конічних зубчастих коліс свідчить про перспективність застосування розглянутих методів підвищення вібраційної міцності зубчастих передач авіаційних редукторів.

Список використаних джерел

1. Hsiang-Hsi (Edward) Lin, Ronald L. Huston, John J. Coy. Dynamic Loads in Parallel Shaft Transmissions. Part I, II. Published in ASME *Journal of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design*. Vol. 110. No 2. June, 1988. P. 221–229, and as NASA Technical Memorandum 100280, 100281 and AVSCOM T.M. 87-C-2, C-3. Reprinted with permission.
2. Авиационные зубчатые передачи и редукторы: справочник / под ред. Э. Б. Вулгакова. Москва: Машиностроение, 1982. 375 с.
3. ISO 6336-6:2006/Cor 1: 2007. Calculation of load capacity of spur and helical gears. Pt. 6: Calculation of service life under variable load. 2006.
4. DIN 3990-2-1987. Calculation of load capacity cylindrical gears. Calculation of pitting resistance. 01.12.1987.
5. ГОСТ 21354-87. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет на прочность. Москва: Изд-во стандартов, 1989. 129 с.
6. Гришечкина М. Г., Щепин А. Н., Иптышев А. А., Смирнов А. П. Применение критериев динамического качества для оценки работоспособности зубчатых передач. *Вестник СибГАУ*. 2017. Т. 18, № 1. С. 33–39.
7. Калинин Д. В. Нелинейные колебания в планетарных редукторах с податливыми опорами центральных колёс. *Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*: электрон. журн. 2016. № 10. С. 69–84.
8. Динамика машин и управление машинами: справочник / под ред. Г. В. Крейнина. Москва: Машиностроение, 1988. 240 с.
9. Kahraman A., Lim J., Ding H. A Dynamic Model of a Spur Gear Pair with Friction. *12th IFTOMM World Congress (Besançon (France), June 18–21, 2007)*.
10. Щепин А. Н., Лимаренко Г. Н., Шевчук М. В. Конечно-элементная модель динамической системы механического привода. *Вестник Красноярского государственного технического университета*. 2004. Вып. 36. С. 46–51.
11. Мак-Лахлан Н. В. Теория и приложения функций Матъе. Москва: Иностранная литература, 1953.
12. Алексеев В. И. Параметрические резонансные колебания зубчатых колёс. *Труды КуАИ*. 1967. Вып. 30. С. 215–225.
13. Курушин М. И., Балякин В. Б., Курушин С. А. Параметрическая неустойчивость динамики зубчатых колёс. *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. 2014. № 5 (47), ч. 1. С. 106–111.
14. Шнеерсон Л. М., Алексеев В. И. Разрушение зубчатых колёс от вибраций. *Вестник машиностроения*. 1961. № 4. С. 8–12.
15. Берестнев О. В., Соболев А. С. Зубчатые колёса пониженной виброактивности. Минск: Наука и техника, 1978. 120 с.
16. Биргер И. А., Шорр Б. Ф., Иосилевич Г. Б. Расчёты на прочность деталей машин: справочник. Москва: Машиностроение, 1979. 702 с.

References

1. Hsiang-Hsi (Edward) Lin, Ronald L. Huston, John J. Coy (June 1988). Dynamic Loads in Parallel Shaft Transmissions. Part I, II. Published in *ASME Journal of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design*, 10 (2), 221–229, and as NASA Technical Memorandum 100280, 100281 and AVSCOM T.M. 87-C-2, C-3. Reprinted with permission.
2. Vulgakov, A. B. (Ed.) (1982). *Aviazionnyye zubchatye peredachi i reduktory [Aviation gearing and reducers]*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
3. ISO 6336-6:2006/Cor 1: 2007. Calculation of load capacity of spur and helical gears. Pt. 6: Calculation of service life under variable load. 2006.
4. DIN 3990-2-1987. Calculation of load capacity cylindrical gears. Calculation of pitting resistance. 01.12.1987.
5. GOST 21354-87. *Peredachi zubchatye zilindricheskie evolventnye vneshnego zacepleniya. Raschet na prochnost. [Transmissions are toothed cylindrical evolvent of the external mesh. Calculation on durability]* (1989). Moscow: Izd-vo standartov [in Russian].
6. Grishchikina, M. G., Stechepin, A. N., Iptyshev, A. A., Smirnov, A. P. (2017). Primenenie kriteriev dinamicheskogo kachestva dlja ozenki rabotosposobnosti zubchatykh peredach [Application of criteria of dynamic quality for the estimation of capacity of gearing]. *Vestnik SibGAU – Siberian Journal of Science and Technology*, 18 (1), 33–39 [in Russian].
7. Kalinin, D. V. (2016). Nelineinye kolebaniia v planetarnykh reduktorakh s podatlivymi oporami zentralnykh kolos [Nonlinear vibrations in planetary reducers with pliable bearings of the central wheels]. *Nauka i Obrazovanie. MGTU im N E Bauman – Science and Education. MSTU nam. N.A. Bauman*, 10, 69–84 [in Russian].
8. Kreinin, G. V. (Ed.) (1988). *Dinamika mashin i upravlenie mashinami: spravochnik [Dynamics of machines and management by machines: reference book]*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
9. Kahraman A., Lim J., Ding H. A Dynamic Model of a Spur Gear Pair with Friction. *12th IFTOMM World Congress* (Besançon (France), June 18–21, 2007).
10. Shechepin, A. N., Limarenko, G. N., Shevchugov, M. V. (2004). Konechno-elementnaja model dinamicheskoi sistemy mehanicheskogo privoda [Certainly-element model of the dynamic system of mechanical drive]. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta – Bulletin of Krasnoyarsk State Technical University*, 36, 46–51 [in Russian].
11. Mak-Lahlan, N. V. (1953) *Teoriia i prilozheniia funktsii Mate [Theory and applications of functions Mate]*. Moscow: Inostrannaia literatura [in Russian].
12. Alekseev, V. I. (1967). Parametricheskie rezonansnye kolebaniia zubchatykh kolos [Parametric resonant vibrations of gear-wheels]. *Trudy KuAI – Proceedings of Kuai*, 30, 215–225 [in Russian].
13. Kurushin, M. I., Baljakin, V. B., Kurushin, S. A. (2014). Parametricheskaia neustoiichivost dinamiki zubchatykh kolos [Parametric instability of dynamics of gear-wheels]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta – VESTNIK of Samara University*, 1 (5 (47)), 106–111 [in Russian].
14. Shneerson, L. M., Alekseev, V. I. (1961). Razrushenie zubchatykh kolos ot vibratsii [Destruction of gear-wheels from vibrations]. *Vestnik mashinostroeniia – Mechanical Engineering Bulletin*, 4, 8–12 [in Russian].
15. Berestnev, O. V., Sobolev, A. S. (1978). *Zubchatye kolea ponizhennoi vibroaktivnosti [Gear-wheels of vibrohypoactivity]*. Minsk: Nauka i tehnika [in Russian].
16. Birger, I. A., Shorr, B. Ph., Eosilevitch, G. B. (1979). *Raschety na prochnost detalei mashyn [Calculations on strength of machine elements]*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].

UDC 629.735.45

Oleg Shapovalov, Denis Kolesnik, Oleg Pilipenko

OSCILLATION PROCESSES IN GEARING OF AVIATION REDUCERS AND WAY OF INCREASE OF THEIR VIBRATIONAL DURABILITY

Urgency of the research. The reducers of aerotechs undergo on wing to the multifrequency oscillation loading as a result of the numerous co-operating of gear-wheels of the different stages with different speeds of rotation. Gear-wheels are in exploitation of reducers, in particular helicopters, test multicomponent different-frequency loadings at fundamental fre-

quency from the rotation of wheel in a few thousand rev/min. Existent vibrations can generate the oscillations of disks of gear-wheels, that conduces to the origin of multisequencing fatigue and rapid exhausting the disks of their longevity.

Target setting. Exposure of possibility of increase of resource of gearing main, intermediate and tail reducing gears of helicopters of Mu-8 and their modifications.

Actual scientific researches and issues analysis. In sparse on different publications, including closed, separate information about the oscillation state of gearing of aviation reducers it is not spared due attention to complex consideration of different types of vibrations, accompanying their exploitation, questions of connection between shake processes in reducing gears and state of their elements.

Uninvestigated parts of general matters defining. Turning, self-reactance and flexural vibrations, inevitably accompanying exploitation of gearing aviation, in particular, helicopter reducers and way of increase of their oscillation durability.

The research objective. To consider shake processes in gearing of aviation reducers and ways of their overcoming.

The statement of basic materials. The torsional, parametric resonance and flexural vibrations of gearing of reducers, natural frequencies and their form, influence of overhead coefficients, descriptions of vibrations of reducers and way of increase of their oscillation durability, are considered.

Conclusion in accordance with the article. The enhanceable dynamic loading in mesh, conditioned by the resonance torsional and parametric vibrations of toothed drives is especially dangerous. Existent positive experience of exploitation of cylindrical and conical gear-wheels testifies to perspective of application of the considered methods of increase of oscillation durability of gearing of aviation reducers.

Keywords: gearing of aviation reducers; torsional; parametric; flexural vibrations.

Fig.: 11. Table: 1. References: 16.

Шаповалов Олег Леонідович – начальник відділу, Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєнь та військової техніки Збройних сил України (вул. Стрілецька, 1, 14033, м. Чернігів, Україна).

Shapovalov Oleg – Head of Department, State Research Institute of Tests and Certification of Armaments and Military Technique of the Armed Forces of Ukraine (1 Striletska Str., 14033 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: ak1149cv@ukr.net

Колесник Денис Миколайович – начальник відділення, Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєнь та військової техніки Збройних сил України (вул. Стрілецька, 1, 14033, м. Чернігів, Україна).

Kolesnik Denis – Chief of Separation, State Research Institute of Tests and Certification of Armaments and Military Technique of the Armed Forces of Ukraine (1 Striletska Str., 14033 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: denis1971@ukr.net

Пилипенко Олег Іванович – доктор технічних наук, професор, керівник секції основ конструювання машин кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна), провідний науковий співробітник, Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєнь та військової техніки Збройних сил України (вул. Стрілецька, 1, 14033, м. Чернігів, Україна).

Pilipenko Oleg – Doctor of Technical Sciences, Professor, leader of the Fundamental Machine Design section, the Welding Technology and Automatized Projecting of Building Structures Department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine), leading scientific coworker, State Research Institute of Tests and Certification of Armaments and Military Technique of the Armed Forces of Ukraine (1 Striletska Str., 14033 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: opilip@ukr.net

ORCID: <http://orcid.org/0000-003-0590-0107>

Scopus Author ID: 16510833000

ResearcherID: G-2533-2016

Dmytro Fedorynenko, Serhii Sapon

HYDROSTATIC SPINDLE FOR ULTRA-PRECISION TWO-SIDED MACHINING

Urgency of the research. Modern development of mechanical engineering creates constantly increasing demands concerning maintenance of quality indicators of detail processing. So, indicator of roughness, admissions of linear sizes and angular are decreased constantly. Application of precision machine tools is an effective way of decision of the tasks in view.

Target setting. Today ultra-precision processing of materials is widely used for manufacture of electronic components of techniques, telecommunication, medical, automobile, optical equipment. Therefore, the designing of ultra-precision machine tools is an urgent task for ensuring the high efficiency of the processes of machining.

Actual scientific researches and issues analysis. Basic component of precision machine tool which defines quality of machining is a spindle. Quality indicators of a spindle are mostly provided with a correct choice of type and design of its bearings. It is showed that hydrostatic bearings together with increase of machining reliability and productivity allow providing of exclusively high indicators of detail machining quality compared with other types of spindle bearings. Besides, they are the most perspective type of spindle bearings for realization of high-speed machining and ultra-precision machining. However hydrostatic bearings are characterized by relatively big power losses on friction and, as a consequence, vigorous heating at increased rotational frequencies. Therefore lubrication of hydrostatic bearings with low viscous liquids, in particular water, presents separate interest.

Uninvestigated parts of general matters defining are designing of new design of a spindle with combined hydrostatic bearing based on special water lubrication for increased precision and efficiency of two-sided ultra-precision machining.

The research objective of this article is designing of new design of a spindle unit with direct drive, clamping fixture and combined hydrostatic bearing, which based on special water lubrication, for increased precision and efficiency of two-sided ultra-precision machining.

The statement of basic materials. New design of a spindle with combined hydrostatic bearing based on special water lubrication and clamping fixture is proposed for increased precision and efficiency of two-sided ultra-precision machining. The design of this precision spindle with direct drive by hollow-shaft torque motor provides two-sided machining of disk-shaped workpieces. The regularities of the formation of stiffness, flow rate and power losses in the combined spindle bearing, depending on viscosity of the working fluid, clearances in the journal and thrust bearings, pump pressure, and size of the bearing lands are defined. As a result of mathematical and CFD modeling rational parameters of combined spindle bearing were identified that provide minimum power losses at operation at simultaneous insuring of the high accuracy of a spindle. For increase of accuracy of clamping advanced design of the clamping fixture with a screw clamping of workpieces on the basis of use of PVC paste as pressure-transmitting environment is offered. The article introduce the use of water lubrication as an effective way of solving issues of increase concerning spindle unit efficiency, the reduction of operating costs due to simultaneous cooling of bearings and spindle drive, and also the increase of environmental friendliness of the design as a whole.

Conclusions. The new design of a spindle unit for two-sided ultra-precision machining with direct drive and clamping device was presented in this article. The main advantage of this solution is the compact structure of the spindle. The direct drive of the spindle with hollow-shaft torque motor can effectively be used for two-sided ultra-precision end turning of the workpieces. The regularities of the flatness deviation formation of the end surface of the workpiece during clamping are established. It is shown that clamping forces acting on the workpiece do not have a significant impact on accuracy of the surfaces machined. The rational geometrical and operational parameters of the clamping for maintenance of high operational reliability are received.

Keywords: clamping fixture; hydrostatic bearings; two-sided machining; spindle; ultra-precision machine tool; water lubrication.

Fig.: 6. References: 10.

Urgency of the research. Modern development of mechanical engineering creates constantly increasing demands concerning maintenance of quality indicators of detail processing. So, indicator of roughness R_a should be $R_a \leq 10$ nm, admissions of linear sizes $T_L \leq 1$ μ m and angular $T_A \leq 1''$. Application of precision machine tools for machining is an effective way of decision of the tasks in view.

Target setting. Today ultra-precision processing of materials is widely used for manufacture of electronic components of techniques, telecommunication, medical, automobile, optical equipment. Therefore, the designing of ultra-precision machine tools is an urgent task for ensuring the high efficiency of the processes of machining.

Actual scientific researches and issues analysis. At Fraunhofer Institute for Production Systems and Design technology IPK and the Institute for Machine Tools and Factory Management IWF of the TU Berlin the new concept of turning machine for two-side machining of the front surfaces of optical elements was developed [1; 2], see Fig. 1.

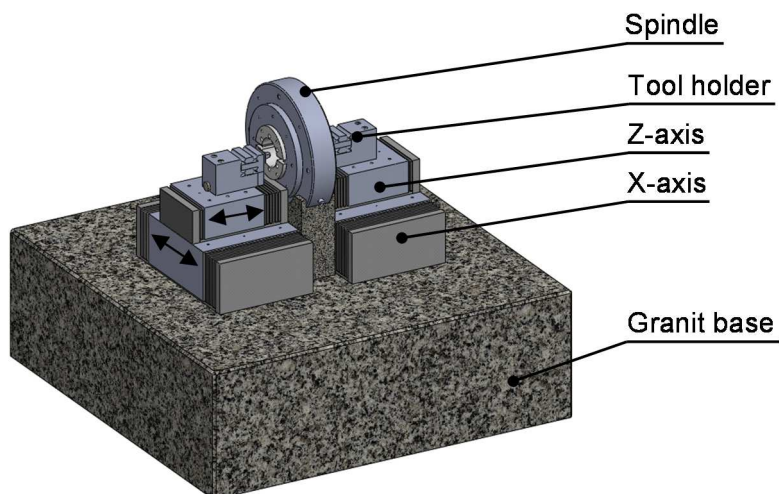


Fig. 1. Machine tool concept for two-side machining of optical elements [1]

As it is marked in works [3], at designing of ultra-precision machine tools the following should be provided: high values of stiffness and damping in technological processing system; minimization of thermal deformations, isolation from external influences. Basic component of precision machine tool which defines quality of machining is a spindle [3]. Accuracy, specific speed, carrying capacity, static stiffness, dynamic quality, thermal stability, reliability which, in turn, depend on their design features, bearing section work capacity of a spindle and ways of lubrication of bearings are basic indicators of quality of spindle. Accuracy of a spindle is characterized by spindle rotational accuracy. Precision machine tools have radial, axial and face error motion of a spindle within $0.01\text{--}0.1\ \mu\text{m}$ [3; 4]. Quality indicators of a spindle are mostly provided with a correct choice of type and design of its bearings.

Aerostatic bearings work very well at high rotational frequencies (to 400,000 rpm) and provide exclusively high rotational accuracy (up to 12 nm) [4], but have very low stiffness and damping. Basic feature of air bearings are small power losses on friction. Technological restrictions of machine tool by processing with insignificant force of cutting are lack of such constructive decision. It does not allow carrying out two-sided machining of workpieces effectively with high accuracy and productivity. The alternative solution is use of spindle hydrostatic bearings. In the works [5, 6] it is stated that hydrostatic bearings which together with increase of machining reliability and productivity allow providing of exclusively high indicators of detail machining quality compared with other types of spindle bearings. Besides, they are the most perspective type of spindle bearings for realization of high-speed machining and ultra-precision machining. Only hydrostatic spindle combines ultra-high accuracy and high effectiveness in vibrations suppression. However, unlike of aerostatic bearings, hydrostatic bearings are characterized by relatively big power losses on friction and, as a consequence, vigorous heating at increased rotational frequencies [4; 5]. Lubrication of hydrostatic bearings with low viscous liquids, in particular water, presents separate interest considering constantly increasing requirements concerning specific speed of spindles [7; 8].

Therefore, the **uninvestigated parts of general matters defining** are designing of new design of a spindle unit with combined hydrostatic bearing based on special water lubrication for increased precision and efficiency of two-sided ultra-precision machining.

The research objective of this article is designing of new design of a spindle unit with direct drive, clamping fixture and combined hydrostatic bearing based on special water lubrication for increased precision and efficiency of two-sided ultra-precision machining.

The statement of basic materials. For conditions of ultra-precision two-sided turning of workpieces, a spindle has to provide axial stiffness approximately three times more than radi-

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

al stiffness. Only annular thrust and cylindrical journal combination with independent supply of fluid in each recess satisfies the requirement of not uniform bearing stiffness. This design of the bearings when using adjustable throttling device at inlet of each recess allows providing different values of axial and radial stiffness in a wide range of their changes. Based on the recommendations of the [4; 9] the number of recesses accepted for journal bearing equals four and one recess for thrust bearing.

Obviously, the most promising solution for double-sided machining is use of built-in torque motor design as spindle drive. In this case, placing rotor of the motor between spindle bearings, we get a compact and symmetric design relative workpiece with free access of tool to the processed surface. Such schematic solution will allow reducing influence of spindle thermal deformation on machining accuracy.

Mathematical Model for Calculation of Main Parameters of Spindle. For conditions of ultra-precision machining, normally there is a small cutting force (up to 2N) and negligible rotor offsets along both radial and axial directions. Then it's fair assumption about the film thickness constancy in the journal and thrust spindle bearings at machining. It is commonly known that in such case the maximum stiffness of hydrostatic bearings with restrictors at low speeds of spindle rotation is achieved when the pressure ratio is $p_k/p_H = 0,5$ [9]. Taking into account above mentioned assumptions, the mathematical model of journal hydrostatic bearing with four recesses will be [4; 9]:

$$\begin{aligned} b &= L - 2l_a, \\ \varphi_k &= \frac{2\pi}{n_p} - \frac{2l_t}{D_p}, \\ S_{ef1} &= (\varphi_k + l_t) \frac{D_p}{2} (l_a + b), \\ C_{p1} &= \frac{3p_H S_{ef1}}{2\delta_p}, \quad Q_r = \frac{\pi p_H (2\delta_p)^3 D_p}{\mu l_a} \\ P_{\mu p} &= \frac{\mu D_p^3 n^2}{2\delta_p} (\pi L - 2b\varphi_k) \end{aligned}$$

where b – recess length in axial direction, D_p – journal bearing diameter, δ_p – radial clearance in the bearing, φ_k – recess length in circular direction, L – journal bearing length, l_a – length of axial land, l_t – length of circular land, μ – coefficient of dynamic viscosity of working fluid, n_p – number of the recesses, $P_{\mu p}$ – viscous friction losses, S_{ef1} – effective area of the journal bearing.

Similarly, given the previous considerations the mathematical model of annular thrust hydrostatic bearing with one recess is the following [9; 10]:

$$\begin{aligned} l_k &= L_o - 2l_o, \\ r_1 &= \frac{D_{po}}{2}, \quad r_2 = r_1 + l_o, \quad r_3 = r_2 + l_k, \quad r_4 = r_3 + l_o, \\ S_{ef2} &= \pi \left[\frac{r_1^4 - r_3^4}{2 \ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)} - \frac{r_2^4 - r_1^4}{2 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \right], \\ C_{p2} &= \frac{3p_H S_{ef2}}{2\delta_o}, \\ Q_o &= \frac{p_H (\delta_o)^3}{\mu} \left[\frac{1}{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)} + \frac{1}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \right], \\ P_{\mu o} &= \frac{\mu n^2}{\delta_o} [(2r_4)^4 - (2r_3)^4 + (2r_2)^4 - (2r_1)^4], \end{aligned}$$

where δ_o – clearance in the thrust bearings, D_{po} – thrust bearing diameter, L_o – thrust bearing width, l_o – width of thrust bearing land, l_k – recess width, $r_1...r_4$ – radii defining position of lands and recess in radial direction, $P_{\mu o}$ – viscous friction losses, S_{ef2} – effective area of thrust bearing, Q_o – fluid flow rate in the thrust bearing.

Fig. 2 shows the geometrical parameters of the combined spindle bearing that are presented in its mathematical model.

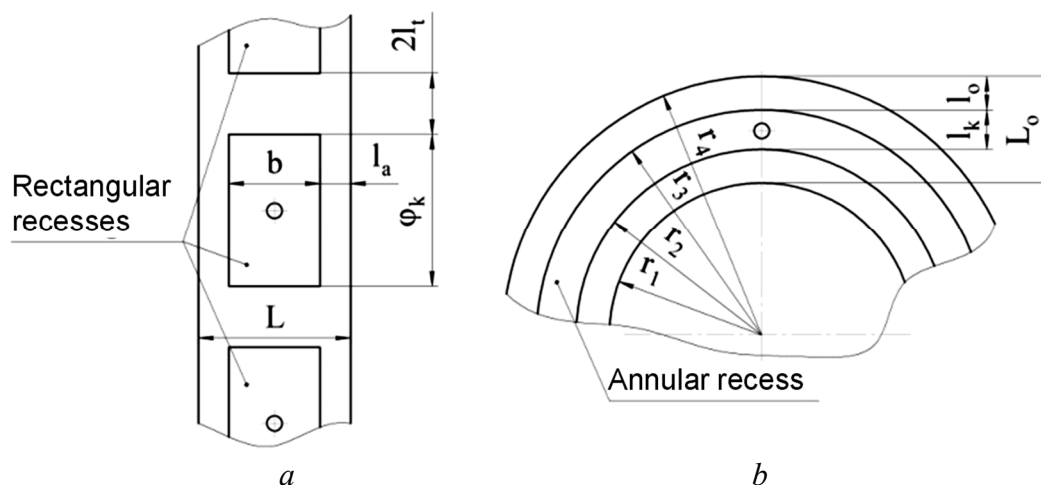


Fig. 2. Geometry of a) journal bearing recesses and b) annular thrust bearing recess

Total characteristics of the combined bearings are calculated by the following dependencies [4; 10]:

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{sum}} &= 2Q_r + 2Q_o, \\
 P_q &= p_H Q_{\text{sum}}, \quad P_\mu = 2P_{\mu p} + 2P_{\mu o}, \quad P_{\text{sum}} = P_q + P_\mu, \\
 P_{\text{dr}} &= \frac{P_\mu + P_{\text{cut}}}{\eta}, \quad P_{\text{cut}} = \frac{\pi D_w n F_c}{60000}, \\
 \Delta T &= \frac{p_H (1 + K_b)}{\rho C_b}, \quad K_b = P_\mu / P_q,
 \end{aligned}$$

where C_b – specific heat capacity of the lubricant, ΔT – temperature drop between entry and exit from the bearing which is estimated for a single pass of lubricant, η – efficiency factor of spindle drive, K_b – power ratio, P_{cut} – maximum value of cutting power at end turning of the workpiece, P_q – pumping losses, P_{sum} – total power losses in the combined bearing, P_μ – total viscous friction losses, Q_{sum} – total flow rate in the combined bearing, Q_r – fluid flow rate in the journal bearing, ρ – density of the working fluid, P_{dr} – spindle drive power.

The average value of clamping force is defined as:

$$F_{c1} = N_{pr} \cdot S_{pr},$$

where N_{pr} – average value of stress on the workpiece outer surface, S_{pr} – area of the workpiece outer surface.

The CAD/CAE system SolidWorks is used to determine characteristics of the area, volume and stress on the part outer surfaces.

Results of Analysis of Hydrostatic Bearings. High values of bearing stiffness can be achieved by rational choice of clearances and increase of pressure p_k in the bearing recesses while ensuring ratios $p_k/p_H = 0,5$. Establishment of rational values of static clearance in journal δ_p and thrust δ_o bearings and also viscosity ν of working fluid are of key importance for minimization of both power losses due to friction P_μ and fluid flow rate Q (Fig. 3).

It is established that static value of clearance δ has the biggest impact on fluid flow rate in journal Q_r and thrust Q_o bearings. However, in case of friction power losses in the bearing the opposite tendency is observed. The biggest influence on friction power losses has viscosity of working fluid. Length l_a of axial journal bearing lands and width l_o of thrust bearing lands have also significant and multidirectional influence on pumping P_q and friction losses P_μ (Fig. 4). It is necessary to search for rational values of clearance δ , viscosity ν , sizes of lands, l_a and l_o , with the aim of increase of efficiency of spindle bearing.

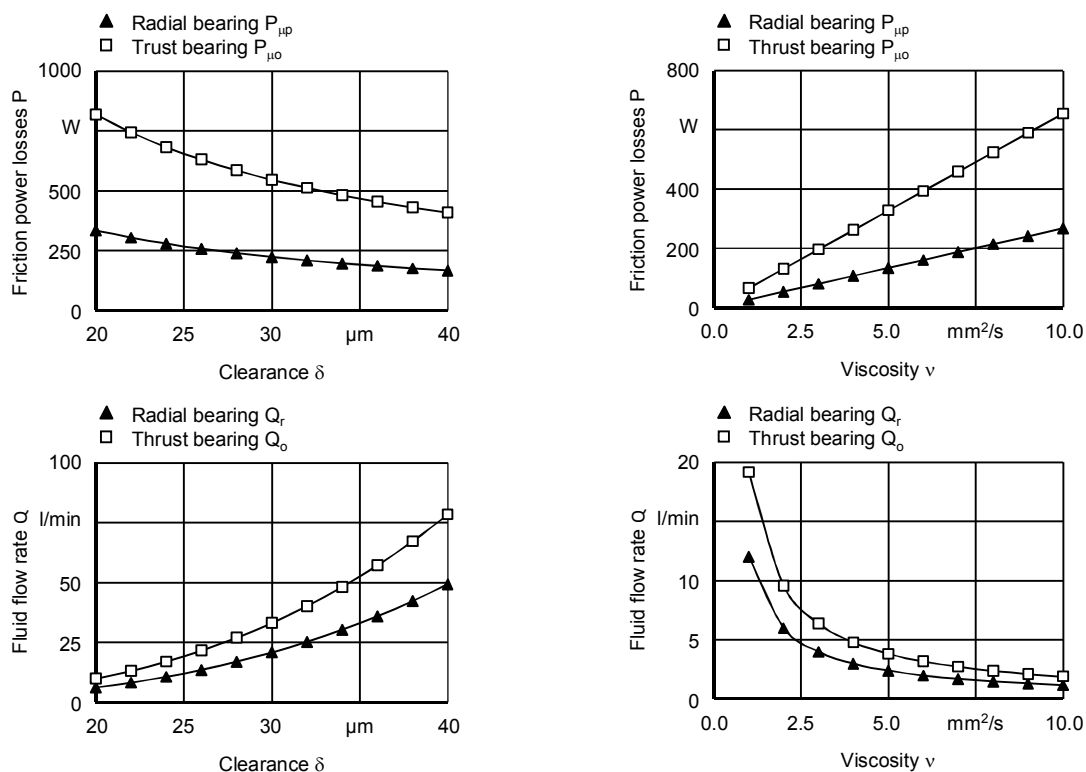


Fig. 3. Flow rate and friction power losses of combined hydrostatic bearings

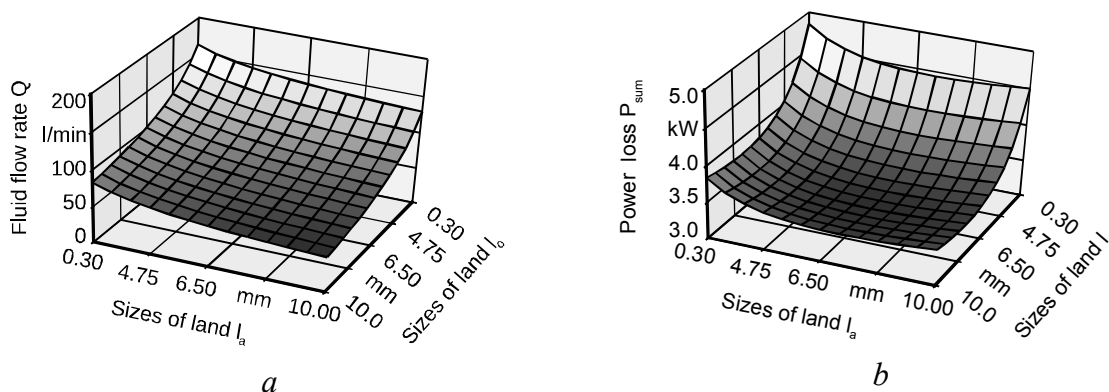


Fig. 4. Total flow rate Q a) and power losses P_{sum} b) in combined hydrostatic bearings

Rational values of these parameters are set as a result of simulation: $\delta_p = 25 \mu\text{m}$; $\delta_o = 25 \mu\text{m}$; $\nu = 1 \text{ sSt}$; $l_a = 6 \text{ mm}$; $l_o = 9 \text{ mm}$ (Fig. 3). This allowed to minimize values of total flow rate Q to 62.3 l/min, $Q_r = 12 \text{ l/min}$, $Q_o = 19.15 \text{ l/min}$; power losses in the bearing $P_{\text{sum}} = 3,400 \text{ W}$, $P_q = 1,560 \text{ W}$, $P_\mu = 1,846 \text{ W}$. Calculated value of maximum power of the spindle drive is 2,073 W (when $n = 2,730 \text{ rpm}$; radial stiffness $C_{p1} = 350 \text{ N}/\mu\text{m}$, axial stiffness $C_{p2} = 1,425 \text{ N}/\mu\text{m}$ (when $p_H = 15 \text{ bar}$); temperature drop between entry and exit from the bearing $\Delta T = 1.42 \text{ }^\circ\text{C}$. It is established that flow pattern of the fluid on the lands is laminar ($Re = 857$ when $n = 2,730 \text{ rpm}$) and in the recesses is mixed.

Modeling of combined hydrostatic bearings by means of FlowWorks Simulation package was performed to check main geometrical and operational parameters obtained above. As a result of simulation pressure distribution on the recesses, lands and drainage channels were defined. The obtained values of pressure in the recesses of the journal bearing (7.47 bar) and thrust bearing (7.42 bar) correspond to the calculated values (7.5 bar) according to the results of mathematical modeling. The values of the pressure in the drainage system of the bearing were used for reasonable selection of seals.

Clamping System for the workpiece. Simulation of the workpiece clamping was divided into two stages: backlash elimination in the coupling of expansion sleeve – workpiece and, in fact, the clamp on the outside diameter $D = 70 \pm 0.005$ providing required clamping force of the fixture. Maximum clearance in the coupling of expansion sleeve – workpiece is $10 \mu\text{m}$. At finishing end turning the cutting force does not exceed the values 2 N , then, considering safety factor to be 2.5 clamping force can be equal to 5 N .

Simulation was performed by means of SolidWorks Simulation. Securing sleeve in the assembly unit was simulated by two connections – fixed geometry at its ends. External load created by pressure of PVC paste was simulated by option of pressure in the inner cavity of the sleeve.

It is established that maximum stress under deformation of the sleeve during diametric backlash elimination $10 \mu\text{m}$ is more than three times less than yield point of the sleeve. Additionally, stresses and displacements of the sleeve clamping surface were defined. Moving of the clamping surface of the sleeve occurs according to the parabolic pattern with reaching the highest value in the middle of the clamping surface.

Dependence of flatness deviation D_{ev} of end surfaces from clamping force was defined. Increase in clamping forces by 10 times to 50 N leads to a linear increase of deviation from flatness up to 3.6 nm , which is almost three orders less than tolerance of the flatness of the workpiece end surfaces ($2 \mu\text{m}$).

One of the main drawbacks of thin-walled clamping devices is the problem of ensuring of set parameters of fatigue strength. For example, basic variant of the expansion sleeve has value of load factor $k_s = 0,4$ and number of cycles to failure $N_c = 1,739$ that doesn't satisfy operational reliability of clamping devices. Moreover, fatigue failure occurs on the fillet radius of internal cavity of the sleeve.

To improve operational reliability of the devices fatigue analysis of the sleeve was fulfilled with varying parameters of radius r and wall thickness h of the clamping surface of the sleeve. As a result of modeling the most rational value of the wall thickness ($h = 0,5 \text{ mm}$) is obtained. When $h = 0,5 \text{ mm}$ the value of fatigue load factor increases to 2 and the value N_c equals to 95010 what corresponds to purpose of use of the fixture.

Analysis of Spindle Conception for Two-Sided Machining. Design of the spindle with combined hydrostatic bearings built for two-sided machining of workpieces was developed according to analysis results (Fig. 5). Special lubricant based on water is used as working fluid. Use of water can effectively solve issues of increase of spindle efficiency, reduce operating costs and increase environmental friendliness of the design as a whole. Use of the mentioned lubrication also allows solving the issue of the spindle drive cooling by fluid supply from one hydraulic power unit.

Spindle has built-in direct drive. Rotor of the motor is placed between two rotating sleeves of the bearings. Bearing sleeves and rotor are fixed by bolts with both sides. Stator of the motor is fixedly mounted on the motor cover. Both bearing housings are based on end surfaces of the stator providing operating clearances in radial and axial directions. Labyrinth seals are applied to prevent fluid leak between the moving and stationary

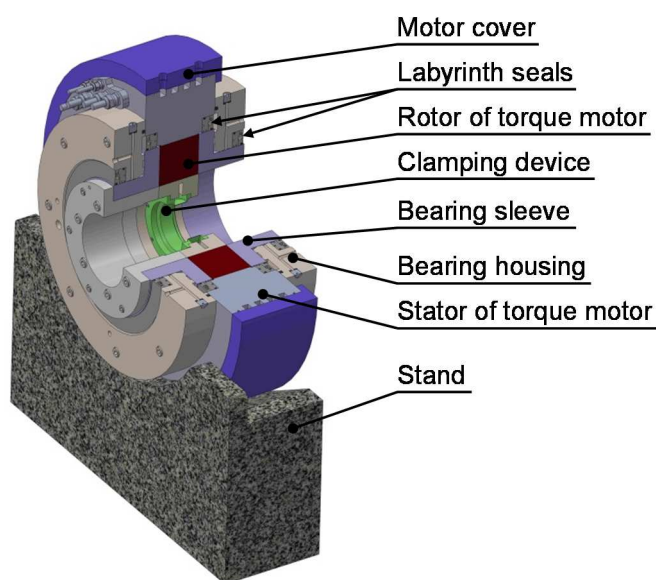


Fig. 5. Spindle unit for two-sided ultra-precision machining with direct drive and clamping device

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

parts of the spindle. Spindle bases on outer prismatic surface of the stand with abutment to the housing end and fixing by bolts. In this case the influence of overturning moment on accuracy of position of the spindle axis is eliminated. During assembly of the unit concentricity of outer surface of the stator to the inner diameter of the rotor within 0.1 mm should be provided.

The fixture unit is based on bearing aperture with abutment to the end of the right cover of the bearing arrangement. There is a special pin to ensure the correct position of the clamping fixture relatively to the spindle at change of the workpiece. To improve fixture accuracy the clamping surface of the extension sleeve should be finally grinded ready-fitted with bearing arrangement.

Expansion sleeve is installed into the clamping housing and fixed with both ends by screws (Fig. 6).

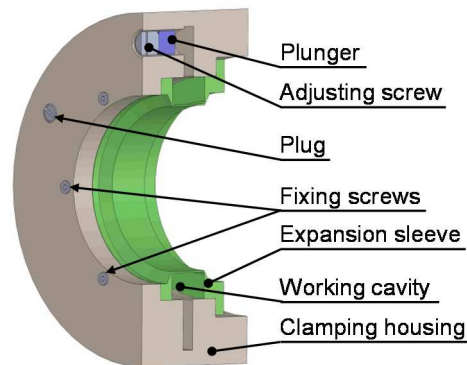


Fig. 6. To illustrate the process of fixing the workpiece

The cavity formed between the clamping housing and expansion sleeve is filled with PVC paste. Screws with plunger and plugs with seals seal working cavity with PVC paste. For fixing of the workpiece a screw drive is used. Necessary fixing effort to the workpiece is created by rotation of the adjusting screw. Thus, the plunger receives linear moving, compressing PVC paste. Pressure upon PVC paste made by the plunger is spread in regular intervals, deforming concentrically the thin-walled part of the expansion sleeve. The backlash between the clamping housing and the workpiece is thus liquidated. As a result the workpiece is clamped and aligned on external diameter with high accuracy. Unclamping of the workpiece is carried out by turning of the adjusting screw in the opposite direction.

Conclusions. To conclude the combined hydrostatic bearings provide a compact spindle unit design simultaneously ensuring high degree of stiffness in axial, over 1,400 N/ μm , and radial direction, around 350 N/ μm . The use of low-viscous lubrication based on water allows providing low friction power losses (1,846 W) at the maximum rotation speed of the spindle. Besides, the application of water for both lubrication of bearing and cooling of the spindle drive reduces operating costs and increases environmental friendliness of the spindle design.

The direct drive of the spindle with hollow-shaft torque motor can effectively be used for two-sided ultra-precision end turning of the workpieces. The main advantage of this solution is the compact structure of the spindle.

For the increase of accuracy of clamping advanced design of the clamping fixture with a screw clamping of workpieces on the basis of PVC paste as pressure-transmitting environment is offered. The regularities of the flatness deviation formation of the end surface of the workpiece during clamping are established. It is shown that clamping forces acting on the workpiece do not have a significant impact on accuracy of the surfaces machined. As a result of the analysis of strain-stress state and fatigue strength of the expansion sleeve rational geometrical and operational parameters of the clamping for maintenance of high operational reliability are received.

Taking into account the obtained value of water temperature drop inside the bearing would be necessary for further analysis of the thermal stability of the spindle during machining.

Acknowledgement. The presented results are part of the project "Development of a spindle with hydrostatic bearings for ultra-precision machining" (ID 57210233) funded by the

DAAD. The authors express sincere gratitude to colleagues from Fraunhofer Institute for Production Systems and Design technology IPK and the Institute for Machine Tools and Factory Management IWF of the TU Berlin who provided equipment as well as recommendation and expertise that greatly assisted the research.

References

1. Uhlmann, E., Oberschmidt, D., Polte, J., Polte, M. and Guhde, S. (2015). New Machine Tool Concept for Two-sided Ultra-Precision Machining. *Euspen's 15th International Conference & Exhibition* (pp. 353–354).
2. Uhlmann, E., Essmann, J., Mahr, F., Herfert, F. and Polte, M. (2014). Machine Assembly, Manufacturing Machine with Machine Assembly, and Use the Method of Manufacturing Rotating Components (in German). Patent DE 10 2012 221 484 A1, Fraunhofer Gesellschaft; TU Berlin.
3. Luo, X., Cheng, K., Webb, D. and Wardle, F. (2005). Design of Ultraprecision Machine Tools with Applications to Manufacture of Miniature and Micro Components. *Journal of Materials Processing Technology*, 167, 515–528.
4. Wardle, F. (2015). *Ultra Precision Bearings*, Elsevier, Woodhead Publishing.
5. Perovic, B. (2012). *Hydrostatic guides and bearings: basic principles, calculation and design of hydraulic diagrams*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg [in German].
6. Fedorynenko, D., Sapon, S. (2016). *Шпиндельні гідростатичні підшипники [Spindle Hydrostatic Bearings]*. Chernihiv: ChNTU [in Ukrainian].
7. Slocum, A. H. (2007). *Water Hydrostatic Bearings for Precision Machine Tools and Industrial Machinery*. *ASPE 22nd Annual Meeting*.
8. Nakao, Y., Mimura, M. and Kobayashi, F. (2003). Water energy drive spindle supported by water hydrostatic bearing for ultra-precision machine tool. *ASPE 18th Annual Meeting*.
9. Push, A. (1992). *Шпиндельные узлы: Качество и надежность [Spindle Units: Quality and Reliability]*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
10. Rowe, W. B. (2012). *Hydrostatic, Aerostatic, and Hybrid Bearing Design*. Elsevier.

References (in language original)

1. Uhlmann E., Oberschmidt D., Polte J., Polte M. and Guhde S. New Machine Tool Concept for Two-sided Ultra-Precision Machining. *Euspen's 15th International Conference & Exhibition*. 2015. P. 353–354.
2. Uhlmann E., Essmann J., Mahr F., Herfert F. and Polte, M. Machine Assembly, Manufacturing Machine with Machine Assembly, and Use the Method of Manufacturing Rotating Components (in German). Patent DE 10 2012 221 484 A1, Fraunhofer Gesellschaft; TU Berlin, 2014.
3. Luo X., Cheng K., Webb D. and Wardle F. Design of Ultraprecision Machine Tools with Applications to Manufacture of Miniature and Micro Components. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005. Vol. 167. P. 515–528.
4. Wardle F. *Ultra Precision Bearings*, Elsevier, Woodhead Publishing, 2015.
5. Perovic B. *Hydrostatic guides and bearings: basic principles, calculation and design of hydraulic diagrams* (in German). Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.
6. Федориненко Д. Ю. Шпиндельні гідростатичні підшипники: монографія / Д. Ю. Федориненко, С. П. Сапон. – Чернігів: ЧНТУ, 2016. – 405 с.
7. Slocum A. H. *Water Hydrostatic Bearings for Precision Machine Tools and Industrial Machinery*. *ASPE 22nd Annual Meeting*, 2007.
8. Nakao Y., Mimura M. and Kobayashi F. Water energy drive spindle supported by water hydrostatic bearing for ultra-precision machine tool. *ASPE 18th Annual Meeting*, 2003.
9. Пуш А. В. Шпиндельные узлы: Качество и надежность / А. В. Пуш. – М. : Машиностроение, 1992. – 286 с.
10. Rowe W. B. *Hydrostatic, Aerostatic, and Hybrid Bearing Design*. Elsevier, 2012.

УДК 621.941-229.3:621.822.172

Дмитро Федориненко, Сергій Сапон

ГІДРОСТАТИЧНИЙ ШПИНДЕЛЬ ДЛЯ УЛЬТРАПРЕЦИЗІЙНОЇ ДВОСТОРОННЬОЇ ОБРОБКИ

Актуальність теми дослідження. Сучасний розвиток машинобудування створює постійно зростаючі вимоги щодо забезпечення показників якості обробки деталей. Так, показник шорсткості, допуски лінійних і кутових розмірів постійно зменшуються. Застосування прецизійних верстатів є ефективним способом вирішення поставлених завдань.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Постановка проблеми. Сьогодні надточна обробка матеріалів широко використовується для виробництва електронних компонентів техніки, телекомунікаційного, медичного, автомобільного, оптичного устаткування. Тому проектування ультрапрецизійних верстатів є актуальним завданням для забезпечення високої ефективності процесів механічної обробки.

Аналіз досліджень і публікацій. Основним вузлом прецизійного верстата, який визначає якість обробки, є шпиндель. Якісні показники шпинделя переважно забезпечуються правильним вибором типу й конструкції його підшипників. Показано, що гідростатичні підшипники разом з підвищенням надійності і продуктивності обробки дозволяють забезпечити виключно високі показники якості обробки деталей в порівнянні з іншими типами шпиндельних підшипників. Крім того, вони є найбільш перспективним типом шпиндельних підшипників для реалізації прецизійної високошвидкісної механічної обробки. Однак гідростатичні підшипники характеризуються відносно великими втратами потужності на тертя і, як наслідок, інтенсивним нагріванням при підвищених частотах обертання. Тому застосування для мащення гідростатичних підшипників малов'язких рідин, зокрема води, становить окремий інтерес.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми полягає в необхідності проектування нової конструкції шпинделя з комбінованим гідростатичним підшипником на основі спеціального водяного мащення для підвищення точності та ефективності двосторонньої ультрапрецизійної обробки.

Метою цієї статті є розробка нової конструкції шпиндельного вузла з прямим приводом, затискним пристроєм та комбінованим гідростатичним підшипником, на основі спеціального водяного мащення, для підвищення точності та ефективності двосторонньої ультрапрецизійної обробки.

Виклад основного матеріалу. Для підвищення точності та ефективності двосторонньої ультрапрецизійної обробки пропонується нова конструкція шпинделя із затискним пристроєм та комбінованим гідростатичним підшипником на основі спеціального водяного мащення. Конструкція цього прецизійного шпинделя з прямим приводом від електродвигуна та з порожнім валом забезпечує двосторонню обробку дископодібних деталей. Визначено закономірності формування жорсткості, витрат і втрат потужності в комбінованому шпиндельному підшипнику, залежно від в'язкості робочої рідини, зазорів у радіальних і упорних підшипниках, тиску насоса і розмірів опорних поверхонь. У результаті математичного та CFD-моделювання були виявлені раціональні параметри комбінованого шпиндельного підшипника, що забезпечують мінімальні втрати потужності при експлуатації при одночасному забезпеченні високої точності шпинделя. Для підвищення точності затиску заготовки пропонується вдосконалена конструкція затискного пристрою з гвинтовим затиском заготовок на основі використання ПВХ-пасти як середовища передаючого тиск. У статті запропоновано використання водяного мащення як ефективного способу вирішення питань підвищення ефективності шпиндельного вузла, зниження експлуатаційних витрат за рахунок одночасного охолодження підшипників і приводу шпинделя, а також підвищення екологічності конструкції загалом.

Висновки відповідно до статті. У цій статті представлено нову конструкцію шпиндельного вузла для двосторонньої ультрапрецизійної обробки з прямим приводом і затискним пристроєм. Головною перевагою цього рішення є компактність шпинделя. Прямий привод шпинделя від електродвигуна з порожнистим валом може ефективно використовуватися для двостороннього ультрапрецизійного точіння заготовок. Встановлено закономірності формування відхилення від площинності торцевої поверхні заготовки під час затискання. Показано, що затискні сили, що діють на заготовку, не впливають на точність оброблених поверхонь. Отримано раціональні геометричні та експлуатаційні параметри затискача для забезпечення високої експлуатаційної надійності.

Ключові слова: затискне пристосування; гідростатичні підшипники; двостороння обробка; шпиндель; ультрапрецизійний верстат; водяне мащення.

Рис.: 6. Бібл.: 10.

Fedorynenko Dmytro – Doctor of Technical Sciences, professor, associate professor of Aerospace Engineering Department, Graduate School of Engineering, Tohoku University (6-6-01 Amarak-Aza-Aoba, Aoba-ku, Sendai 980-8570 Japan).

Федориненко Дмитро Юрійович – доктор технічних наук, професор, доцент кафедри аерокосмічної інженерії, Вища інженерна школа університету Тохоку (6-6-01 Amarak-Aza-Aoba, Aoba-ku, Sendai 980-8570, Японія).

E-mail: fedorynenko.dmytro.b3@tohoku.ac.jp

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3884-2698>

ResearcherID: G-5665-2014

SCOPUS Author ID: 56737122400

Sapon Serhii – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Machine Building Technology and Wood Processing Department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

Сапон Сергій Петрович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технологій машинобудування і деревообробки, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

E-mail: s.sapon@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1082-6431>

ResearcherID: G-7764-2014

SCOPUS Author ID: 56736964700

УДК 621.9

DOI: 10.25140/2411-5363-2019-1(15)-106-114

Сергій Майданюк, Любов Ковальова

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИСКОВОГО ІНСТРУМЕНТУ ДЛЯ ГВИНТОВИХ КАНАВОК СВЕРДЕЛ

Актуальність теми дослідження. Високі експлуатаційні характеристики свердла (точність оброблення, стійкість, надійність відведення стружки) забезпечуються точним розрахунком інструменту другого порядку. Тому розробка ефективних методик та алгоритмів профілювання є актуальною та становить практичну цінність.

Постановка проблеми. Розвиток методів профілювання, які повинні забезпечувати вирішення завдань профілювання на сучасному науково-технічному рівні, у найкоротші терміни при економії ресурсів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Були розглянуті останні публікації у відкритому доступі, зокрема й методи геометричного твердотілого моделювання процесу формоутворення гвинтових поверхонь.

Виділення недосліджених раніше частин загальної проблеми. Підвищення точності графічних методів профілювання, за рахунок використання сучасного інструментального середовища універсальних САД-систем.

Постановка завдання. Вдосконалення методики профілювання дискових інструментів, розробка алгоритму комп'ютерного моделювання процесу формоутворення стружкової канавки свердла.

Виклад основного матеріалу. Прямі та зворотні задачі профілювання дискового інструменту вирішені за допомогою типових операцій поверхневого та твердотілого моделювання універсальної САД-системи.

Висновки відповідно до статті. Розроблено алгоритми та параметричну 3D модель процесу формоутворення гвинтової стружкової канавки спіральних свердел дисковими інструментами, які дозволяють вирішувати пряму та зворотню задачі профілювання, визначати можливі вихідні інструментальні поверхні при варіюванні параметрів встановлення, прогнозувати похибки профілювання.

Ключові слова: профілювання; дисковий інструмент; стружкова канавка; гвинтова поверхня; САД-система.

Рис.: 6. Табл.: 1. Бібл.: 10.

Актуальність теми дослідження. У сучасному машинобудуванні при обробленні отворів широко використовуються спіральні свердла як стандартні, так і спеціальних конструкцій. Профіль гвинтової канавки визначає основні параметри робочої частини, а саме, форму та геометрію головної та допоміжної різальних кромки, міцність та жорсткість свердла, умови розміщення та відведення стружки із зони різання.

Найчастіше для формоутворення стружкових канавок свердел використовують операції фрезерування та шліфування, тобто оброблення дисковими інструментами – фасонними дисковими фрезами та шліфувальними кругами.

Високі експлуатаційні характеристики свердел (точність оброблення отвору, міцність, стійкість, надійність відведення стружки) забезпечуються точним розрахунком інструменту другого порядку.

При проектуванні дискових інструментів першим етапом є профілювання – визначення вихідної інструментальної поверхні обертання по відомому профілю стружкової канавки. Задача є однією з найбільш трудомістких в інструментальному виробництві. Тому створення ефективних методик і алгоритмів вирішення задачі профілювання є актуальною задачею та несе практичну цінність як для конструкторів, так і для студентів відповідних спеціальностей.

Постановка проблеми. Розвиток методів профілювання, які повинні забезпечувати вирішення завдань профілювання на сучасному науково-технічному рівні, у найкоротші терміни при економії ресурсів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найбільш складним етапом у профілюванні дискових інструментів є етап визначення вихідної інструментальної поверхні. Задача вирішувалася багатьма дослідниками. У результаті були розроблені різноманітні графічні [1–3; 5], аналітичні [1–3; 4] та чисельні [6; 7; 10] методи визначення поверхні обертання, спряженої з гвинтовою поверхнею канавки свердла.

Серед графічних методів найбільшого поширення набули: метод нормальних перетинів, метод сумішених перерізів, а також методи, засновані на нелінійному відображенні простору за допомогою гвинтового проектування. У графічних методах найчастіше просторова задача визначення вихідної інструментальної поверхні зводилася до плоскої задачі,

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

шляхом розгляду сукупності перетинів спряжених поверхонь деталі та вихідної інструментальної поверхні площинами, перпендикулярними осі свердла або дискового інструменту.

Графічні методи є найбільш простими та наочними, дозволяють знаходити нові закономірності, аналізувати вирішувані задачі, використовуються як для виведення аналітичних залежностей для розрахунку профілю інструменту, так і як контрольні, за допомогою яких легко виявляються помилки аналітичного профілювання. До недоліків графічних методів треба віднести їх невисоку точність.

Різноманітність аналітичних методів пов'язана з тим, що при вирішенні поставлених задач використовувався або загальний аналітичний метод визначення обвідних поверхонь, або кінематичний метод визначення обвідних поверхонь, заснований на вирішенні рівняння контакту, або метод загальних нормалей. Аналітичні методи найбільш точні, дозволяють визначити безліч можливих варіантів вихідної інструментальної поверхні та вибирати з них найбільш доцільну поверхню для певних виробничих умов. Однак використовувані аналітичні рішення є недостатньо наочними, часто важко формалізуються, вимагають виведення складних аналітичних залежностей, розв'язання диференціальних або трансцендентних рівнянь із застосуванням методів обчислювальної математики.

Чисельні методи спираються на графічні методи, засновані на мінімізації відстаней від осі інструменту до точок ліній перетину гвинтової поверхні площинами, перпендикулярними осі дискового інструменту. Методи володіють достатньою для практики точністю, є повністю формалізованими та використовують методи обчислювальної математики при їх реалізації.

Застосування аналітичних і чисельних методів профілювання можливо тільки в межах спеціальних програмних продуктів або математичних систем автоматизованого проектування універсального призначення.

Нині найбільш ефективно виконується вирішення задач формоутворення поверхонь на основі застосування методів поверхневого і твердотілого моделювання засобами універсальних CAD-систем [8; 9]. У наведених роботах показана можливість застосування таких систем, як AutoCAD, T-FLEX, Cimatron для вирішення задач профілювання різноманітних гвинтових поверхонь. Ці методи мають високу точність, при збереженні перерахованих переваг графічних методів, дозволяють швидко й без додаткових витрат, розв'язувати задачі профілювання, крім того, вони застосовуються для візуалізації результатів інших методів. Однак прикладів вирішення задач профілювання дискових інструментів для гвинтових канавок свердел у CAD-системах у літературі не наведено.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Підвищення точності графічних методів профілювання, за рахунок використання сучасного інструментального середовища універсальних CAD-систем.

Постановка завдання (цілей статті). Вдосконалення методики профілювання дискових інструментів, розробка алгоритму комп'ютерного моделювання процесу формоутворення стружкової канавки свердла.

Виклад основного матеріалу.

В інструментальному виробництві розрізняють такі види задач профілювання: пряма задача, зворотна задача, задача оптимізації установчих параметрів інструменту.

У роботі розглянуто вирішення прямої та зворотної задачі профілювання дискового інструменту за допомогою типових операцій поверхневого та твердотілого моделювання універсальної CAD-системи Autodesk Inventor.

Як приклад у роботі розглядається спіральне свердло для оброблення легких сплавів діаметром 9,1 мм за ГОСТ 19543-74.

Пряма задача.

У роботі розроблена параметрична 3D модель формоутворення дискового інструменту для обробки гвинтових канавок свердел, на основі відомої методики профілювання [1-3].

Першим етапом методики профілювання є визначення вихідної інструментальної поверхні як огинаючої до послідовних положень поверхні канавки свердла, які вона займає в процесі оброблення, відносно нерухомого інструменту.

При профілюванні вважаються відомими: діаметр свердла D , діаметр серцевини свердла d_0 , кут при вершині 2φ , кут нахилу гвинтової канавки ω , установчі параметри осі дискового інструменту: кут схрещування E осі свердла та дискового інструменту, міжосьова відстань A між віссю свердла та дискового інструменту, положення точки схрещування осей, задане відстанню K . Зазвичай кут E між осями дискового інструменту та свердла визначається за залежністю:

$$E = 90^\circ - \omega - (1^\circ \dots 2^\circ).$$

Міжосьова відстань A визначається відповідно до розмірів серцевини свердла d_0 та проектованого інструменту D_i :

$$A = \frac{D_i + d_0}{2}.$$

Положення точки схрещування осей K залежить від кута ψ та становить:

$$K = \frac{\psi \cdot H}{360^\circ},$$

де H – крок гвинтової канавки, що визначається відповідно до параметрів гвинтової канавки:

$$H = \pi \cdot D \cdot \operatorname{ctg}(\omega).$$

Кут ψ залежить від профілю торцевого перерізу гвинтової канавки та визначається залежністю:

$$\psi = 0,5 \cdot (\psi_{\max} + \psi_{\min}),$$

де ψ_{\max} та ψ_{\min} відповідно максимальний та мінімальний кути нахилу дотичних до точок торцевого перерізу канавки, розташованих на зовнішньому діаметрі свердла.

Схема формоутворення включає в себе швидке обертання дискового інструменту навколо своєї осі та повільний рух гвинтової подачі з кроком, що збігається з кроком гвинтової канавки та віссю, що збігається з віссю свердла. Рух подачі призводить до ковзання гвинтової поверхні канавки «самої по собі» та при профілюванні не враховується. Таким чином, при визначенні вихідної інструментальної поверхні враховується тільки рух обертання навколо осі інструменту другого порядку.

Профіль торцевого перетину гвинтової канавки (рис. 1) визначається графічно за відомою методикою [1–3], з умови отримання на свердлі прямолінійної різальної кромки, що розташовується під кутом φ до осі свердла.

Вважаються відомими: кут нахилу гвинтової канавки ω , діаметр серцевини d_0 , діаметр спинки D_l , ширина стрічки f . Побудовані точки робочої ділянки стружкової канавки апроксимуються сплайном, а неробоча ділянка оформлюється у вигляді дуги кола.

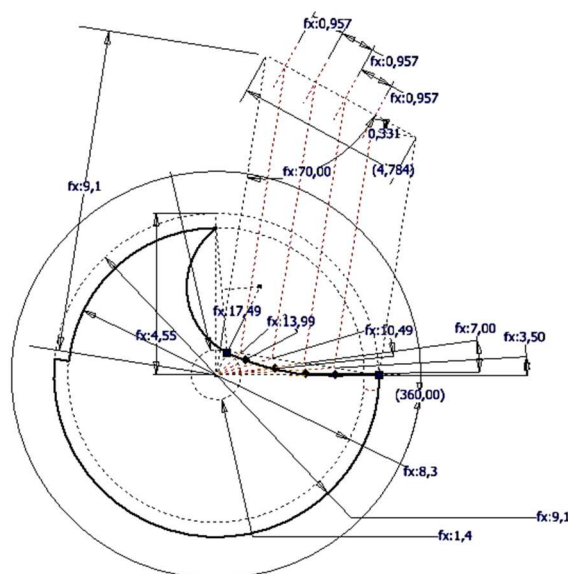


Рис. 1. Торцевий переріз стружкової канавки свердла (вихідний)

Аналіз процесу проектування дозволив виділити параметри моделі гвинтової канавки свердла, найменування, позначення, позначення в Inventor і початкові значення величини яких наведені в таблиці.

Таблиця

Параметри моделювання дискового інструменту для гвинтової канавки свердла

№ з/п	Найменування параметра	Позначення	Позначення в Inventor	Початкові значення
1	Діаметр свердла	D	D	9,1 мм
2	Діаметр серцевини	d_0	d0	1,4 мм
3	Діаметр спинок	D_1	D1	8,3 мм
4	Ширина стрічки	f	f	0,55 мм
5	Кут при вершині	2φ	f2	140 град.
6	Кут нахилу гвинтової канавки	ω	w	40 град.
7	Діаметр дискового інструменту	D_i	Di	50 мм
8	Положення точки схрещування	K	K	4,259 мм
9	Кут між осями інструменту та свердла	E	E	49 град.
10	Міжосьова відстань	A	A	25,7 мм

Алгоритм комп'ютерного моделювання зводиться до таких етапів:

1. Побудова циліндричної заготовки свердла діаметром D по відомому торцевому перерізу гвинтової канавки довжиною, що становить $H/4$, вздовж осі Z , перпендикулярної площині XU . Цей крок виконується командою «Выдавливание». Довжина циліндричної заготовки визначена таким чином, щоб отримати $1/4$ частину всієї гвинтової поверхні, що достатньо для подальшого профілювання та не потребує багато ресурсів обчислювальної техніки, а також скорочує час профілювання загалом.

2. Побудова поверхні гвинтової стружкової канавки свердла по відомому торцевому перерізу гвинтової канавки командою «Пружина» з параметрами: крок H , довжина $H/4$. Довжина прийнята з умов економії часу профілювання та не впливає на процес профілювання загалом.

3. Побудова осьової площини та осі дискового інструменту, положення яких визначається заданими установчими параметрами.

4. Обертання гвинтової поверхні навколо осі інструменту симетрично на кут 45° з кількістю елементів, що становить 90. У системі геометричного твердотільного моделювання цьому відповідає операція «Круговий масив» (рис. 2).

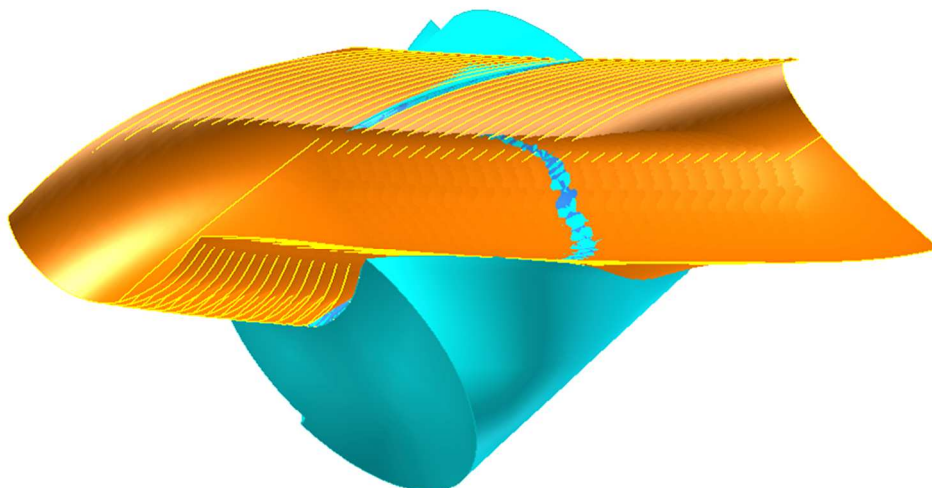


Рис. 2. Положення гвинтової поверхні канавки свердла при її обертанні

5. Визначення осьового профілю вихідної інструментальної поверхні як огинаючої сімейства ребер елементів кругового масиву, отриманого за допомогою операції «Проектування ребер», у вигляді сплайну (рис. 3, а). Коригування осьового профілю проводиться за необхідності, відповідно до умов формоутворення [1–3].

6. Побудова тіла, обмеженого вихідною інструментальною поверхнею, командою «Обертання» (рис. 3, б).

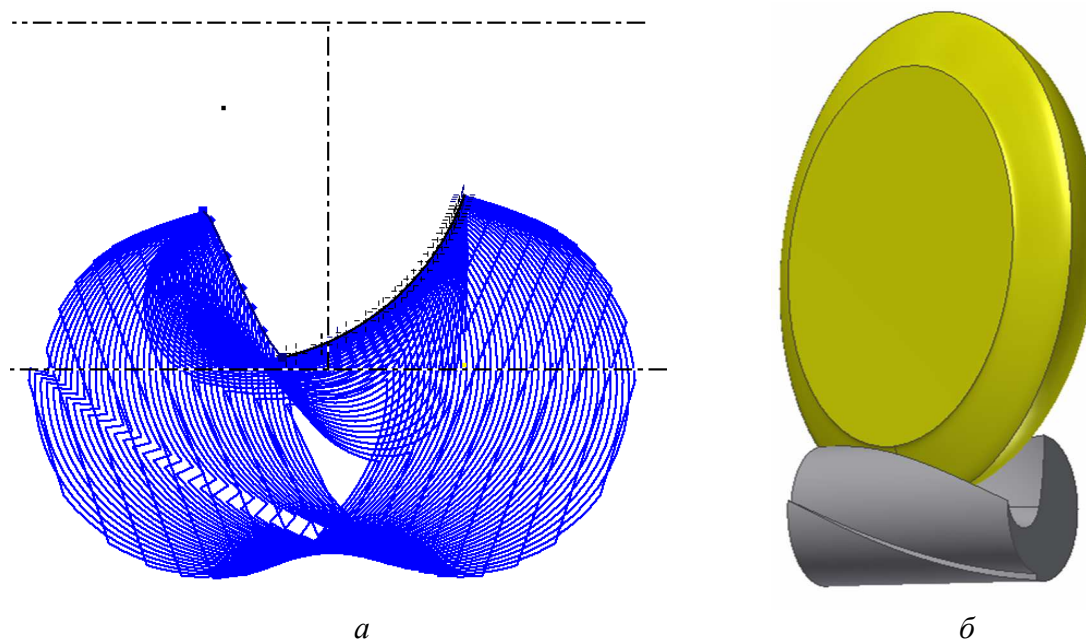


Рис. 3. Вихідна інструментальна поверхня дискового інструменту

Зворотна задача.

При обробленні стружкової канавки заданим дисковим інструментом задача визначення профілю обробленої поверхні зводиться до задачі знаходження огинаючої поверхні обертання при її гвинтовому русі.

Вихідними даними є вихідна інструментальна поверхня та положення її осі відносно осі свердла, тобто осі гвинтового руху.

Алгоритм комп'ютерного моделювання процесу формоутворення зводиться до таких етапів:

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

1. Побудова циліндричної заготовки свердла діаметром D , по відомому торцевому перерізу гвинтової канавки, довжиною, що становить $H/4$, вздовж осі Z , перпендикулярній площині XU . Цей крок виконується командою «Видавлювання».

2. Побудова осьової площини та осі дискового інструменту, положення яких визначається заданими установчими параметрами.

3. Побудова тіла інструменту, обмеженого вихідною інструментальною поверхнею, за відомим профілем в осьовій площині командою «Обертання». Якщо пряма й зворотна задачі вирішуються послідовно для тих параметрів гвинтової канавки і установчих параметрів, які збігаються, то перший і другий пункти алгоритму пропускаються.

4. Побудова послідовних положень дискового інструменту при його гвинтовому русі. Ця операція в середовищі САД-системи відповідає команді «Прямокутний масив» за двома напрямками, з кількістю елементів, що дорівнює 45, симетрично, вздовж напрямної гвинтової канавки, на всю довжину (рис. 4).

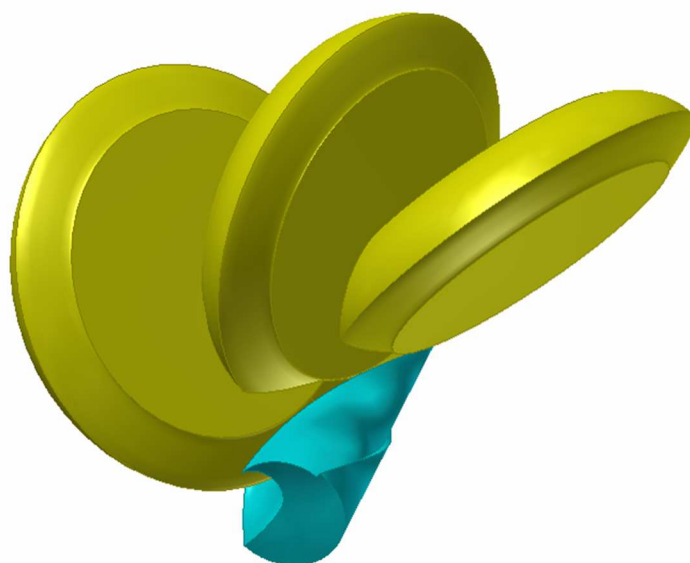


Рис. 4. Положення дискового інструменту при його гвинтовому русі

5. Визначення торцевого перерізу гвинтової канавки свердла, як огинаючої сімейства ребер елементів прямокутного масиву у вигляді сплайну (рис. 5). Коригування осьового профілю проводиться за необхідності, відповідно до умов формоутворення [1 - 3].

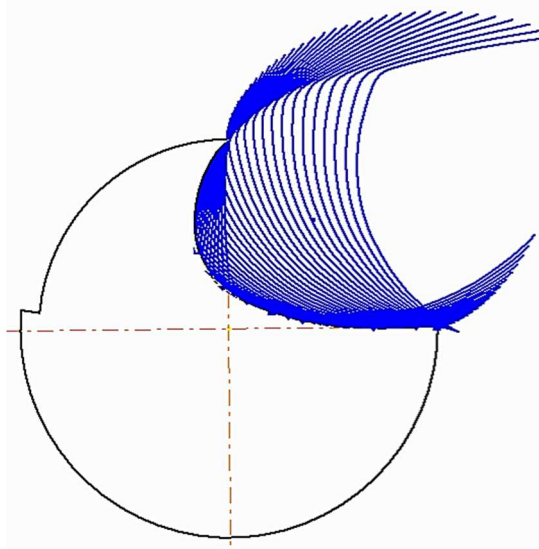


Рис. 5. Торцевий переріз стружкової канавки свердла (отриманий)

6. Порівняння вихідного й обробленого профілів гвинтової стружкової канавки з метою визначення похибок профілювання. Якщо похибка більше допуску на виготовлення профілю, то необхідно змінити кут схрещування осей або положення точки схрещування осей.

Вихідні дані вводяться за допомогою форми «Моделювання» (рис. 6), розробленої за допомогою технології iLogic системи Inventor.

Вкладка «Параметри свердла» (рис. 6, а) призначена для введення параметрів свердла, для якого виконується профілювання дискового інструменту. Вкладка "Установчі параметри" (рис. 6, б) призначена для введення вихідних даних установчих параметрів, відповідно для яких виконується профілювання. Значення установчих параметрів можуть прийматися або відповідно до рекомендацій [1–3], або обиратися самостійно. Після введення параметрів відбувається моделювання вихідної інструментальної поверхні дискового інструменту для гвинтової канавки свердла.

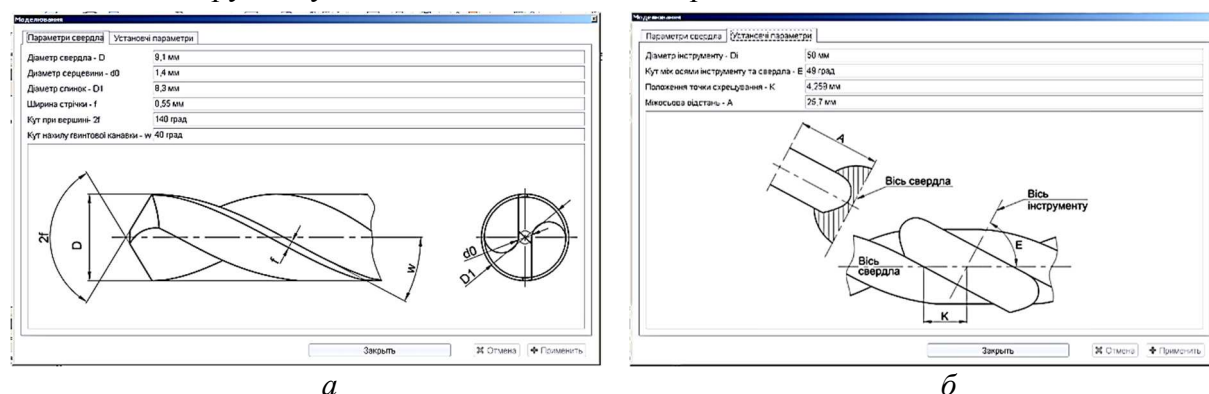


Рис. 6. Форма «Моделювання»:

а – вкладка «Параметри свердла»; б – вкладка «Установчі параметри»

Висновки відповідно до статті. Розроблено алгоритми та параметричну 3D модель процесу формоутворення гвинтової стружкової канавки спіральних свердел дисковими інструментами, які дозволяють вирішувати пряму та зворотну задачі профілювання, визначати можливі вихідні інструментальні поверхні при варіюванні параметрів встановлення, прогнозувати похибки профілювання.

Список використаних джерел

1. Родин П. Р. *Металлорежущие инструменты*. Киев: Вища школа, 1986. 400 с.
2. Родин П. Р. *Основы проектирования режущих инструментов*. Киев: Вища школа, 1990. 424 с.
3. Родин П. Р., Равська Н. С., Ковальова Л. І., Родин Р. П. *Різальний інструмент у прикладах і задачах: навчальний посібник*. Киев: Вища школа, 1994. 294 с.
4. Лашнев, С. И., Юликов, М. И. *Проектирование режущей части инструмента с применением ЭВМ*. Москва: Машиностроение, 1980. 208 с.
5. *Руководство по курсовому проектированию металлорежущих инструментов: учебное пособие для вузов* / Кирсанов Г. Н. та ін. Москва: Машиностроение, 1986. 288 с.: ил.
6. Ковалева Л. И. *Разработка численных методов профилирования фасонных фрез: дис. канд. техн. наук* / Киевский политехнический институт. Киев, 1988. 243 с.
7. Петухов Ю. Е. *Профилирование режущих инструментов в среде T-FLEX CAD-3D*. *Вестник машиностроения*. 2003. № 8. С. 67–69.
8. Лялюк В. Н. *Методика поверхностного геометрического моделирования дисковых фрез для изготовления винтовых поверхностей*. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. 2005. № 4. С. 46–47.
9. Ляшков А. А. *Геометрическое и компьютерное моделирование формообразования поверхностей деталей: монография*. Омск: ОмГТУ, 2013. 89 с.
10. Бржозовский Б. М., Захаров О. В. *Автоматизированное проектирование дискового инструмента для обработки винтовых поверхностей*. *Труды XI Международной конференции «Си-*

стемы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта» CAD/CAM/PDM (Москва, 18–20 октября, 2011 г.). Москва: ИПУ, 2011. С. 182–184.

References

1. Rodin, P. R. (1986). *Metallorzhushchie instrumenty [Metal cutting tools]*. Kyiv: Vishcha shkola [in Ukrainian].
2. Rodin, P. R. (1990). *Osnovy proektirovaniia rezhushchikh instrumentov [Fundamentals of cutting tools design]*. Kyiv: Vishcha shkola [in Ukrainian].
3. Rodin, P. R., Ravska, N. S., Kovalova, L. I., Rodin, R. P. (1994). *Rizalniy instrument u prykladakh i zadachakh. Navchalnyi posibnyk [Cutting tool in examples and tasks. Tutorial]*. Kyiv: Vishcha shkola [in Ukrainian].
4. Lashnev, S. I., Iulikov, M. I. (1980). *Proektirovanie rezhushchei chasti instrumenta s primeneniem EVM [Designing the cutting part of the tool with the use of computers]*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
5. Kirsanov, G. N., Arbuzov, O. B., Borovoi, Iu. L. ... Grechishnikov, V. A. (1986). *Rukovodstvo po kursovomu proektirovaniiu metallorzhushchikh instrumentov [Guide to the course design of metal cutting tools]*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
6. Kovaleva, L. I. (1988). *Razrabotka chislennykh metodov profilirovaniia fazonnykh frez. (Dissertatsiia kandidata tekhnicheskikh nauk) [Development of numerical methods of profiling of shaped mills]*. (Candidate's thesis). Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv [in Ukrainian].
7. Petukhov, Iu. E. (2003). *Profilirovanie rezhushchikh instrumentov v srede T-FLEX CAD-3D [Profiling of cutting tools in T-FLEX CAD-3D]*. *Vestnik mashinostroeniia – Mechanical Engineering Bulletin*, 8, 67–69 [in Russian].
8. Liulko, V. N. (2005). *Metodika poverkhnostnogo geometricheskogo modelirovaniia diskovykh frez dlia izgotovleniia vintovykh poverkhnostei [Method of surface geometrical modeling of disk mills for manufacturing of screw surfaces]*. *Khimicheskoe i neftekhazovoe mashinostroenie – Chemical and oil and gas engineering*, 4, 46–47 [in Ukrainian].
9. Liashkov, A. A. (2013). *Geometricheskoe i kompiuternoe modelirovanie formoobrazovaniia poverkhnostei detalei. [Geometric and computer modeling of shaping of parts surfaces]* (Monograph). Omsk: OmGTU [in Russian].
10. Brzhozovskii, B. M., Zakharov O. V. (2011). *Avtomatizirovannoe proektirovanie diskovogo instrumenta dlia obrabotki vintovykh poverkhnostei [Automated design of a disk tool for machining screw surfaces]*. *Proceeding from Trudy XI mezhdunarodnoi konferentsii «Sistemy proektirovaniia, tekhnologicheskoi podgotovki proizvodstva i upravleniia etapami zhiznennogo tsikla promyshlennogo produkta» CAD/CAM – XI International Conference «CAD / CAM / PDM, Systems Design, Process Production Preparation and Industrial Product Lifecycle Management»*. (Moscow, October 18–20, 2011). Moscow: IPU [in Russian].

UDC 621.9

Serhii Maidaniuk, Liubov Kovalova

COMPUTER MODELING OF THE DISK TOOL FOR SCREW GUNS DRILLS

Urgency of the research. High performance characteristics of the drill (machining accuracy, durability, chip removal reliability) are ensured by an accurate calculation of a second-order tool. Therefore, the development of effective methods and profiling algorithms is relevant and is of practical value.

Target setting. The development of profiling methods that should provide a solution to the problems of profiling at a modern scientific and technical level, in the shortest possible time while saving resources.

Actual scientific researches and issues analysis. The latest open access publications were considered, including methods of geometric solid modeling of the process of forming helical surfaces.

Uninvestigated parts of general matters defining. Improving the accuracy of graphical profiling methods through the use of modern instrumental environments of universal CAD-systems.

The research objective. Improving the method of profiling disk tools, developing an algorithm for computer modeling of the process of forming the chip groove of the drill.

The presentation of the main material. Direct and inverse problems of disk tool profiling are solved using typical surface and solid modeling operations for a universal CAD-system.

Conclusions. Algorithms and a parametric 3D model of the process of forming helical grooves of spiral drills with disk tools have been developed that allow solving the direct and inverse problems of profiling, determine possible initial instrumental surfaces when the settings are varying.

Keywords: profiling; disk tool; chip groove; screw surface; CAD- systems.

Fig.: 6. Table: 1. References: 10.

Майданюк Сергій Володимирович – асистент кафедри інтегрованих технологій машинобудування, Національний технічний університет України «Київський політехнічний університет ім. І. Сікорського» (просп. Перемоги 37, м. Київ, 03056, Україна).

Maidaniuk Serhii – assistant of Integrated Manufacturing Engineering Department, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (37 Peremohy Av., 03056 Kyiv, Ukraine).

E-mail: maysv3@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2853-8606>

Ковальова Любов Іванівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інтегрованих технологій машинобудування, Національний технічний університет України «Київський політехнічний університет ім. І. Сікорського» (просп. Перемоги 37, м. Київ, 03056, Україна).

Kovalova Liubov – PhD in Technical science, Associate Professor, Associate Professor of Integrated Manufacturing Engineering Department, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (37 Peremohy Av., 03056 Kyiv, Ukraine).

E-mail: kovluba36@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8541-7627>

РОЗДІЛ II. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 004.7

DOI: 10.25140/2411-5363-2019-1(15)-115-126

Роман Андрущенко

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ СЕРІАЛІЗАЦІЇ ДАНИХ У КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖАХ

Актуальність теми дослідження. У наш час спостерігається значне збільшення трафіку в мережі Інтернет та в локальних мережах. Тому необхідно приділяти увагу ефективності процесів прийому/передачі даних у мережевому програмному забезпеченні. Програмне забезпечення, яке тим чи іншим чином передає дані по комп'ютерній мережі, виконує операції серіалізації/десеріалізації внутрішніх структур у потік байтів. Ці процеси є необхідними і можуть безпосередньо впливати на механізми комунікації між хостами. У статті проведено порівняльний аналіз форматів серіалізації структурованих даних, та досліджено вплив компресії на прикладному рівні моделі OSI. Проведене дослідження дасть змогу покращити процеси передачі даних у межах моделі OSI, беручи до уваги високорівневу структуру даних, що передаються.

Постановка проблеми. Процеси перетворення внутрішніх структур даних програмного забезпечення до вигляду, прийняттого для передачі через мережу, можуть впливати на швидкість та надійність роботи програмного забезпечення. Проблема полягає в тому, що сучасне програмне забезпечення виконує значну, а іноді й зайву, роботу при передачі даних, передаючи надлишкову інформацію. Також протоколи різних рівнів моделі OSI зазвичай не беруть до уваги особливості самих даних, розглядаючи їх лише як потік байтів, що призводить до менш ефективних результатів. Одним із способів покращення цієї ситуації є виокремлення структурних особливостей даних, що передаються, та аналіз того, як вони впливають на процес серіалізації та десеріалізації.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Розглянуто публікації, матеріали конференцій у сфері інформаційних технологій за темою дослідження, а також офіційну документацію популярних форматів даних та інтернет-стандарту RFC. Проведено аналіз наявних досліджень роботи протоколів прикладного рівня та форматів серіалізації даних.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Дослідження впливу внутрішньої структури та формату даних, що передаються, на показники ефективності передачі даних з урахуванням стандартних методів компресії на прикладному рівні моделі OSI (GZIP).

Постановка завдання. Провести порівняльний аналіз показників роботи текстових та бінарних форматів серіалізації даних, дослідити ефективність їх роботи.

Виклад основного матеріалу. Проаналізована, протестована робота реалізації текстових та бінарних форматів серіалізації даних на наборах повідомлень різного розміру та різної структури за допомогою експерименту.

Висновки відповідно до статті. У статті наведено результати порівняльного аналізу текстових та бінарних форматів серіалізації даних. Сформульовані переваги та недоліки використання стандартних механізмів компресії на прикладному рівні моделі OSI у комбінації з різними механізмами серіалізації.

Ключові слова: HTTP; серіалізація даних; компресія даних; комп'ютерна мережа; кодування; мережеве програмне забезпечення.

Рис.: 10. Табл.: 1. Бібл.: 20.

Актуальність теми дослідження. Прикладне програмне забезпечення, яке тим чи іншим чином передає структуровані дані через комп'ютерні мережі, виконує такі операції: серіалізацію даних, безпосередню передачу по мережевому каналу, прийом даних та десеріалізацію. Ці етапи є необхідними при передачі будь-яких внутрішніх структур даних і від них безпосередньо залежить швидкість і надійність роботи програмного забезпечення. Тому у зв'язку зі значним збільшенням трафіку в мережі Інтернет та локальних мережах необхідно приділяти увагу ефективності процесів прийому/передачі даних у мережевому програмному забезпеченні [1; 2].

Постановка проблеми. Прикладне програмне забезпечення працює на вищих рівнях моделі OSI для передачі даних через комп'ютерні мережі: від транспортного рівня до прикладного. Процеси перетворення внутрішніх структур даних програмного забезпечення до вигляду, прийнятого для передачі через мережу, впливають на швидкість та надійність роботи програмного забезпечення. Існує багато способів серіалізації/десеріалізації даних, і кожен із них має як свої переваги, так і недоліки. Проблема полягає в тому, що більшість працюючого програмного забезпечення виконує значну, а іноді й зайву, роботу при передачі даних, передаючи надлишкову інформацію, яка і так відома обома сторонам передачі – як передавачу, так і приймачеві.

Особливо це стосується найпопулярніших форматів серіалізації JSON, XML та найпопулярнішого текстового протоколу прикладного рівня – HTTP. У цій статті розглянуто та проаналізовано роботу і продуктивність 9 різних механізмів серіалізації в комбінації з компресією GZIP, яка є де-факто стандартом у протоколі HTTP.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найпопулярніші формати серіалізації даних (наприклад: XML, JSON) мають декілька реалізацій. Кожна з реалізацій має як свої переваги, так і недоліки. Зокрема, дослідження різних реалізацій проведено в статті [3]. У статті вказано, що бібліотечні реалізації, які використовують автоматичний парсинг програмних об'єктів і структур даних, потребують додаткових ресурсів на обробку даних, що негативно впливає на швидкість їхньої роботи.

У статі [4] порівнюється ефективність JSON, XML, Thrift та Protobuf на мобільних пристроях, що актуально у зв'язку зі збільшенням популярності мобільних платформ та операційних систем iOS та Android. Наголошується, що мобільні пристрої мають свої особливості, пов'язані зі значно меншою кількістю доступних ресурсів.

Залежність часу, необхідного для серіалізації та десеріалізації даних у файл, від типу даних та їх об'єму, досліджується у статті [5] для форматів JSON, YAML. Також у цій же статі розглянуто стандартні механізми серіалізації Java та C#: JDK Serialization, Object Serializaton in .NET Framework. Зазначено, що не рекомендується використовувати стандартні механізми серіалізації.

У статті [6] запропоновано спосіб оптимізації серіалізації даних, який показує кращі результати (як за необхідним часом, так і за розміром вихідної структури), аніж JSON, XML та MessagePack.

У роботі [7] розглянуто використання Protocol Buffers у сфері мікроблогінгу, де аналізується робота Protocol Buffers при передачі великої кількості невеликих за розміром повідомлень. У статті [8] проведено дослідження концепцій збереження цілісності даних у текстових форматах JSON та XML.

Розглянуто офіційні документи-специфікації форматів серіалізації даних: JSON, XML, BSON, Smile, MessagePack, Protocol Buffers, Flat Buffers, Apache Thrift [9-16].

У цій роботі проаналізовано швидкість та результати роботи таких форматів: XML, JSON, BSON, MessagePack, Smile, Protocol Buffers, Flat Buffers, Apache Thrift.

XML – Extensible Markup Language. Формат описує клас об'єктів даних, що називаються XML-документами, і частково описує поведінку комп'ютерних програм, які їх обробляють [9].

JSON – JavaScript Object Notation. Це текстовий незалежний формат, який використовує конвенції мов програмування сімейства C. JSON побудований на двох структурах: колекції пар «назва/значення» та упорядковані списки значень, що реалізуються як масив, вектор, список або послідовність. [10]

BSON – Binary JSON. Як і JSON, BSON підтримує багаторівневі структури документів та масивів. BSON можна порівнювати з бінарними форматами обміну, наприклад, Protocol Buffers. На відміну від останнього, він більш гнучкий. Однак BSON має накладні витрати, адже схема даних передається разом із самими даними [11].

Smile – це бінарний формат даних, еквівалент стандартного формату даних JSON. Дані кодуються по секціях. Кожна секція складається з набору токенів, які формують відповідні ключі та значення [12].

MessagePack – механізм серіалізації/десеріалізації об'єктів та формат обміну даними, подібний до BSON та Smile. В MessagePack є своя система типів та присутні оптимізації для складних об'єктів та бінарних/текстових даних довільної довжини [13].

Protocol Buffers – нейтральний та платформи-незалежний спосіб серіалізації та передачі структурованих даних, розроблений Google. Кожне повідомлення в Protocol

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Buffers є невеликим логічним записом інформації, що містить серію пар імя-значення. Схема даних задається у файлах спеціального формату *.proto. Protocol Buffers використовує подвійне кодування цілих чисел: ZigZag + VarInt [14].

Flat Buffers – формат та метод серіалізації даних, подібний до Protocol Buffers, але спеціально розроблений для систем із дійсно високим навантаженням. Його особливість полягає в оптимізованому використанні системних ресурсів – як часу на серіалізацію/десеріалізацію, так і на розмір використовуваної пам'яті. Flat Buffers надає доступ до даних без процесу серіалізації/десеріалізації. [15].

Варто зазначити, що в роботах [3; 5; 6] проаналізовано процес серіалізації внутрішніх структур даних на пристрої постійної пам'яті, тобто зберігання у файл. У цій же статті проаналізовано процес серіалізації для передачі даних через мережу.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Дослідження впливу внутрішньої структури та формату даних, що передаються, на показники ефективності передачі даних з урахуванням стандартних методів компресії на прикладному рівні моделі OSI (компресія GZIP).

Постановка завдання. Метою цієї роботи є визначення, аналіз та порівняння швидкості та результатів роботи текстових та бінарних механізмів серіалізації/десеріалізації даних на масивах різного розміру та структури та з урахуванням стандартних алгоритмів компресії з метою прийому/передачі даних через комп'ютерні мережі.

Виклад основного матеріалу. Передача даних у комп'ютерних мережах у протоколах верхнього рівня (транспортний рівень моделі OSI та вище) у прикладному програмному забезпеченні виконується за допомогою абстракцій. В операційних системах для цього застосовуються такі абстракції, як сокети (Sockets). У прикладному ж ПЗ використовують таку абстракцію, як потоки даних (streams) або потоки вводу/виводу (input/output streams). Для зменшення навантаження на канал передачі даних застосовують алгоритми компресії. Компресія в цьому випадку – це додатковий етап, який не є обов'язковим, але який може бути застосований до будь-яких даних, незалежно від їх походження, протоколу, використовуваного формату серіалізації і т. ін. Однак, враховуючи особливість роботи з комп'ютерними мережами, а саме те, що дані приймаються та відправляються до каналу передачі як однонаправлений потік, то не всякі алгоритми компресії можуть бути застосовані, а тільки ті, які можуть працювати з однонаправленими потоками даних. Де-факто стандартом у мережі Інтернет є компресія даних у форматі GZIP, що використовує формат Deflate. Тому варто розглядати всі формати саме з урахуванням можливості їх поєднання з додатковим кодуванням GZIP (Deflate) [17].

Формат Deflate. Deflate – це формат компресії даних без втрат, який використовує комбінацію алгоритму LZ77 та кодування Хаффмана. Особливістю Deflate є те, що його можна застосовувати в умовах обмежених ресурсів проміжного буферу зберігання даних. Тобто навіть якщо на вході маємо потік розміром в 1 Гб та більше, Deflate дозволяє обробити цей потік послідовно в умовах ліміту ресурсів. Також Deflate може бути реалізованим способами, які не підпадають під патентні обмеження.

Код Хаффмана – це префіксний код, такий що жодне закодоване слово не є префіксом іншого закодованого слова. Символи, частота появи яких вища, кодуються меншим кодом і навпаки. Тобто для набору символів $a_1, a_2, a_3, \dots, a_N$ алфавіту A , частота появи яких задається деякими значеннями з множини $P \{p_1, \dots, p_N\}$ будується відсортована таблиця символів, така що $p_1 > p_2 > \dots > p_N$, тобто в порядку зменшення частоти появи символів.

Далі будується дерево Хаффмана для кодування символів. Усі символи є листями дерева. Далі беруться два символи з найменшою частотою та об'єднуються у вузол $a_{N,N-1}$, значенням якого є сума частот об'єднаних символів $p = p_N + p_{N-1}$.

Після цього операція повторюється доти, поки всі символи не будуть об'єднані в дерево (рис. 1) [18].

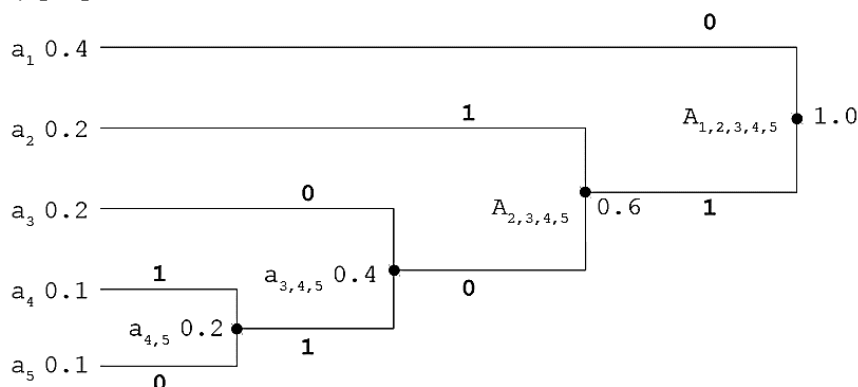


Рис. 1. Приклад дерева Хаффмана

Далі, спускаючись від кореня дерева, отримаємо такі коди для символів:

$$a_1 - 0, a_2 - 11, a_3 - 100, a_4 - 1011, a_5 - 1010.$$

Біти 0 та 1 можна назначати гілкам дерева в довільному порядку. Головна вимога – від кожного вузла має відходити 2 вітки – з «0» та з «1».

Варто зазначити, що побудова коду Хаффмана не є однозначною. Може існувати декілька способів сформуванню дерева. З множини варіантів кодів Хаффмана кращим вважається той, у якого менша дисперсія. Дисперсія показує, як сильно відрізняються розміри кодів від середнього значення. Дисперсія розраховується таким чином:

$$D = \sum (c_N - \bar{c})^2; \tag{1}$$

$$\bar{c} = \sum \frac{c_N}{N}, \tag{2}$$

де \bar{c} – середнє значення розміру закодованого символу;

c_N – розмір закодованого символу, у бітах;

N – загальна кількість символів.

Алгоритм LZ77. У Deflate кодування Хаффмана поєднується з алгоритмом LZ77, який дозволяє замінювати входження однакових послідовностей посиланнями на перше входження. LZ77 працює наступним чином:

1. Задається структура на потоці вхідних даних (рис. 2).

Словник (Dictionary) та випереджаючий буфер (Buffer) – складові частини вікна, де нові вхідні символи витісняють найдавніші. Розмір вікна – I та розмір буфера – J є фіксованими значеннями та задаються перед початком виконання алгоритму. Від цих значень залежить швидкість та ступінь компресії.

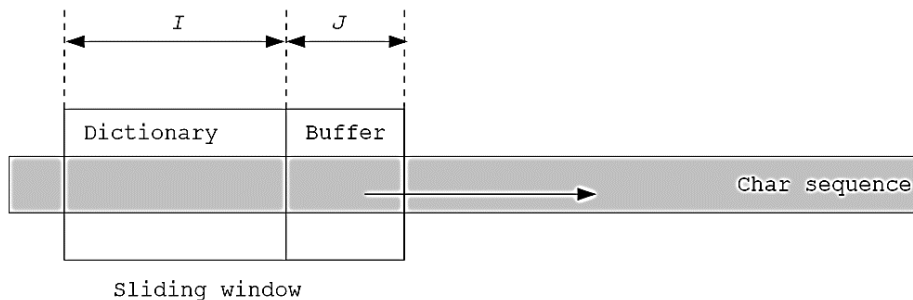


Рис. 2. Механізм потокового кодування LZ77

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

2. Послідовність T_j починаючи з позиції i кодується трійкою у формі $\langle d, l, s \rangle$, де:

d – дистанція, відносно зміщення до послідовності;

l – довжина послідовності;

s – символ.

Трійка значень $\langle d, l, s \rangle$ означає послідовність символів $T_j = T [i \dots i+l] = T [i-d \dots d+l]s$, де i – поточна позиція початку буфера.

Тобто послідовність $T [i \dots i+l]$ довжиною l має інше входження в оригінальну послідовність символів, та знаходиться раніше на відстані в d символів від поточної позиції.

3. Значення d та l мають відповідати таким умовам: $d \in [1 \dots L]$, $l \in [1 \dots J]$, тобто відстань до послідовності не має перевищувати розміру вікна, а довжина не має бути більшою за розмір буфера.

4. Алгоритм LZ77 шукає найбільш можливу повторювану послідовність, тобто кодує підпослідовність із максимально можливою довжиною l в межах заданого буфера.

Отже, GZIP дозволяє зменшити розмір вхідних даних, використовуючи комбінацію кодування Хаффмана та алгоритм LZ77, причому він може ефективно працювати на послідовностях великого розміру та може бути застосованим у комбінації з будь-якими іншими форматами даних [19-20].

Програмний стек Apache Thrift. На відміну від інших форматів, перелічених в аналізі літератури, окремо необхідно розглянути Apache Thrift. Зазвичай на високих рівнях моделі OSI розділяють протоколи від форматів серіалізації. Програмний стек надає більш комплексний підхід. Він об'єднує протоколи передачі даних та формати серіалізації в одну систему, що дозволяє досягати кращих характеристик при передачі даних через комп'ютерну мережу. Це пояснюється тим, що формат серіалізації та протокол створюються з урахуванням особливостей один одного.

Apache Thrift – це легковісний та незалежний від мови програмування програмний стек із відповідним механізмом генерації коду для RPC. Thrift надає абстракції для передачі даних, їх серіалізації та обробки на рівні додатків.

На відміну від Protocol Buffers та Flat Buffers, Apache Thrift дозволяє не тільки описати схему даних, а й методи їх обробки – сервіси. Thrift підтримує різні мови програмування, включаючи C++, Java, Python, PHP та Ruby [16].

У цьому дослідженні інтерес становлять TBinaryProtocol та TCompactProtocol.

Варто окремо відмітити те, що з погляду реалізації, Apache Thrift є дуже зручним у використанні. Apache Thrift є гнучким рішенням, оскільки він із коробки надає різні модифікації протоколів передачі даних. При цьому він простіший у використанні, ніж Flat Buffers та Protocol Buffers, а результати кодування дають кращі результати, ніж Flat Buffers, та не набагато гірші, ніж Protocol Buffers [16].

Аналіз показників ефективності передачі даних різного об'єму

Дослідження ефективності розглянутих форматів кодування структурованих даних необхідно проводити на наборах різного розміру.

Для повної картини мають бути проаналізовані такі показники:

- 1) час, необхідний для серіалізації структур даних в in-memoу бінарний потік;
- 2) результуючий розмір бінарного потоку після серіалізації.

Також усі ці показники необхідно перевірити як без додаткової компресії GZIP, так і з компресією GZIP. Швидкість передачі даних через мережевий канал залежить у цьому випадку лише від розміру серіалізованих даних.

Для генерації структурованих даних, схожих на реальні, використано інструмент Faker. Зокрема, за допомогою цього інструменту були згенеровані три структури різного розміру, що містять числові дані, об'єкти, масиви та текстові дані:

- data_tiny.bin (1 Кб у форматі Java Serialized);
- data_small.bin (10 Кб у форматі Java Serialized);
- data_medium.bin (100 Кб у форматі Java Serialized).

Заміри для кожного тесту повторювались 100 разів. З отриманих результатів відкидалися перші 10 тестів, які можна вважати «холодним запуском». Це потрібно для того, щоб уникнути спотворення результатів (рис. 3).

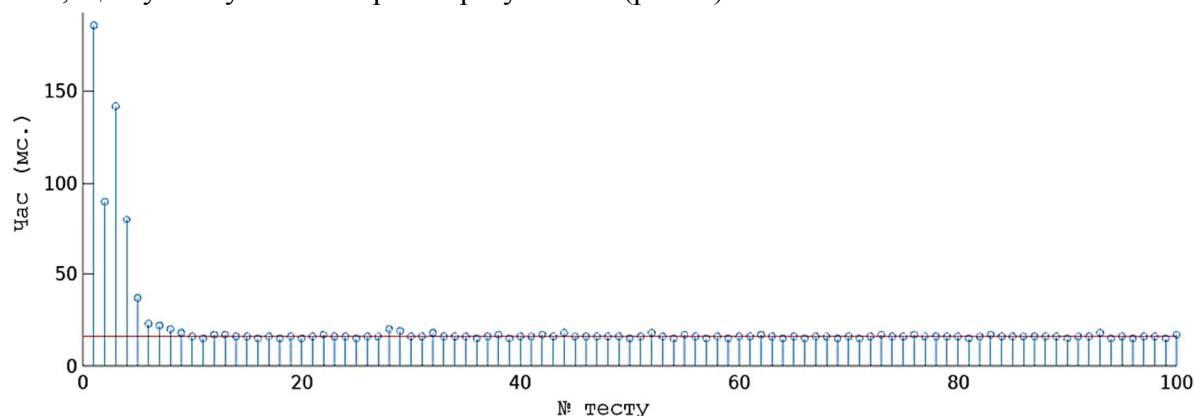


Рис. 3. Спотворення результатів першими запусками

Замір часу, необхідного на формування структур даних та їх серіалізацію в бінарних потік байтів, відбувався за допомогою спеціального буфера в оперативній пам'яті, який створювався безпосередньо перед кожним тестом. Також перед кожною ітерацією виконувався запит на запуск GC (Garbage Collection), щоб уникнути переривання процесу аналізу та впливу на результат. Оскільки Garbage Collection не є детермінованим, то був застосований метод перевірки на основі Weak References.

Кожен тест складався з декількох ітерацій, зокрема:

- 1) для повідомлень розміром 1 Кб у кожному тесті проводилось 5000 ітерацій
- 2) для повідомлень розміром 10 Кб у кожному тесті проводилось 1000 ітерацій
- 3) для повідомлень розміром 100 Кб у кожному тесті проводилось 100 ітерацій

На діаграмі (рис. 4) зображено порівняльні результати серіалізації малих повідомлень (1 Кб) без компресії. Взято значення медіани за результатами 100 тестів. Для більш точних результатів у кожному тесті серіалізація/десеріалізація даних виконувалась 5000 разів, оскільки розміри пакетів даних надто малі.

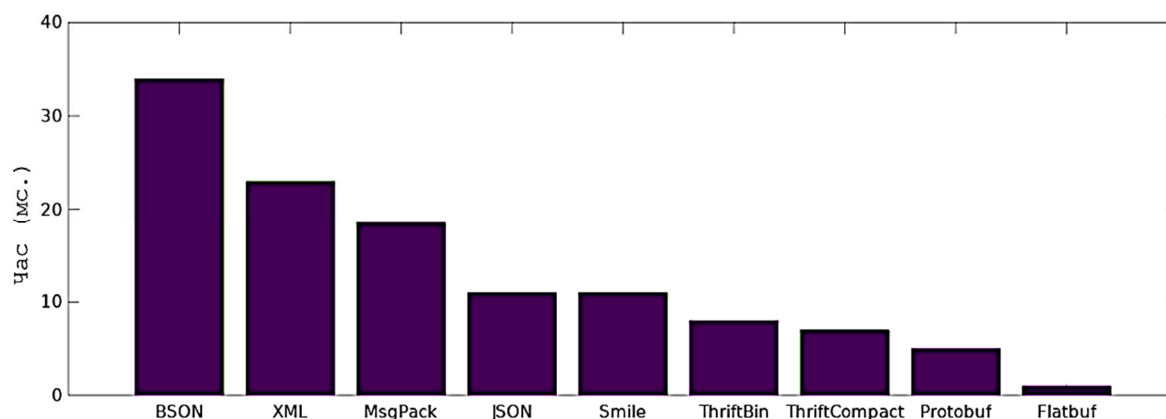


Рис. 4. Час серіалізації 5000 малих повідомлень по 1 Кб

Як можна бачити з вищенаведених рисунків, Flat Buffers майже миттєво працює з кодуванням/декодуванням даних. Це пояснюється тим, що Flat Buffers не трансформує дані взагалі ніяким чином. Внутрішнє представлення будь-яких структурованих даних є просто байтовий буфер. Декодування відбувається лише якщо є явний запит конкретних значень полів структури. Також цікавий результат дали BSON та XML. Виявляється, що незважаючи на бінарну природу BSON, працює він гірше, ніж JSON.

Далі порівнюється час серіалізації малих повідомлень із компресією GZIP.

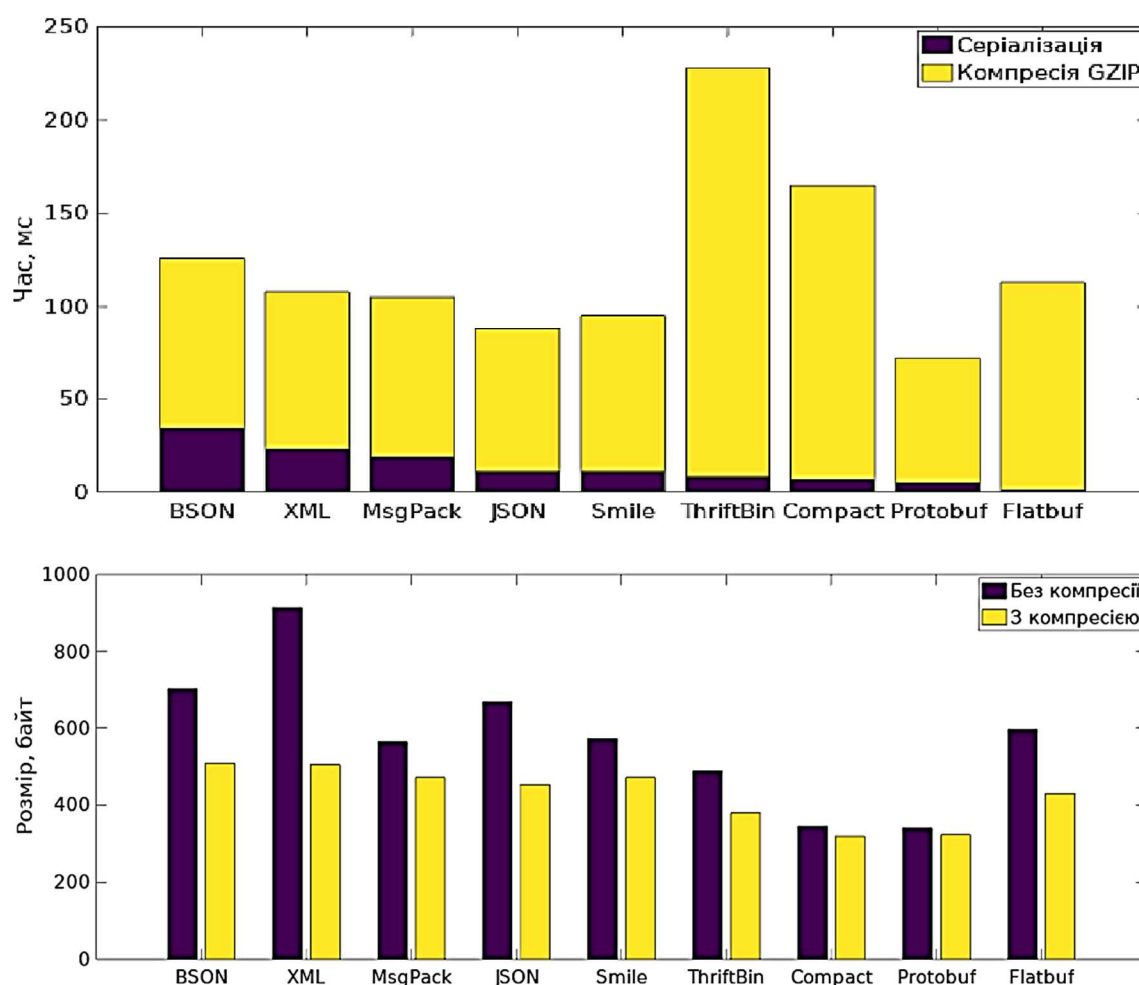


Рис. 5. Час серіалізації 5000 малих повідомлень по 1 Кб з компресією (зверху) та результуючий розмір серіалізованих повідомлень (знизу)

Apache Thrift як для протоколу TBinary, так і для протоколу TCompact показує значно гірші результати в разі застосування компресії GZIP. Це пов'язано з особливостями програмної реалізації протоколів Apache Thrift, зокрема через використання шарів абстракції над алгоритмами серіалізації та передачі даних.

Отже, загалом застосування компресії несе значний приріст часу на кодування/декодування повідомлень. Тому її необхідно застосовувати з обережністю.

Компресія ефективна для текстових форматів – XML, JSON, а також, як показав аналіз, BSON та Flat Buffers незважаючи на їхню бінарну природу, теж добре піддаються компресії, принаймні для повідомлень розміром в 1 Кб. Protocol Buffers та Thrift Compact майже не піддаються компресії.

Таким чином, можна припустити, що чим більша частка текстових даних, тим краще працює компресія GZIP. Для перевірки цієї гіпотези було створено просту структуру, розміром 10 Кб, яка складається з текстового масиву та масиву чисел, згенерованих інструментом Faker. Далі згенерована структура була серіалізована без GZIP та з GZIP, та розрахований ступінь компресії як:

$$R = \frac{N_{GZIP}}{N_{PLAIN}}. \quad (3)$$

Для зменшення впливу випадкового фактора, тест було повторено 50 разів, та взято середнє значення (рис. 6).

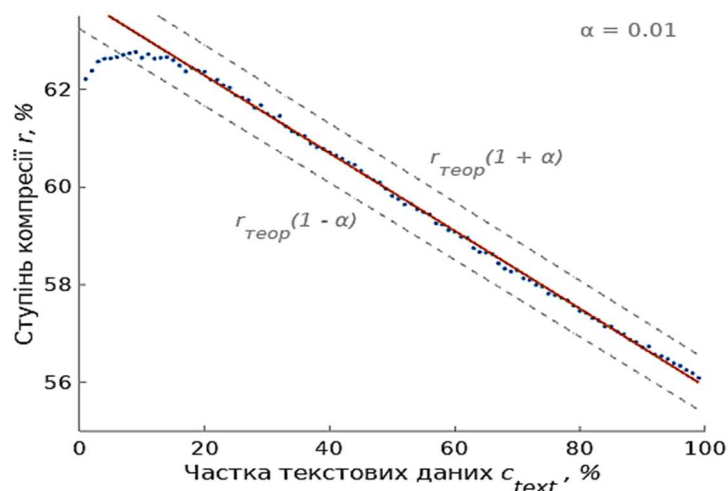


Рис. 6. Залежність ступеня компресії GZIP від частки текстових даних

Починаючи з частки текстових даних у 20 % залежність є лінійною. Під час аналізу масиву даних із відкритих ресурсів було виявлено (таблиця нижче), що частка текстових даних здебільшого вища за 20 %, тому можна допустити використання саме лінійного закону при реалізації форматів серіалізації даних із компресією GZIP.

Таблиця

Відкриті ресурси структурованих даних

Опис	Адреса в мережі Інтернет
Дані по астронавтах	http://api.open-notify.org
Дані по нобелівських лауреатах	http://api.nobelprize.org/v1
Історичні події по регіонах	http://www.vizgr.org/historical-events
Демографічні дані по країнах	http://api.population.io/1.0
Фінансові дані ринків та ВВП країн	http://api.worldbank.org
Інформація по телепрограмах	http://api.tvmaze.com
Бази даних Yahoo	https://query.yahooapis.com/v1
База даних НАСА	https://data.nasa.gov

Далі були проведені тести для структур даних розміром в 10 Кб. У кожній ітерації – по 1000 повідомлень. Нижче показані отримані результати:

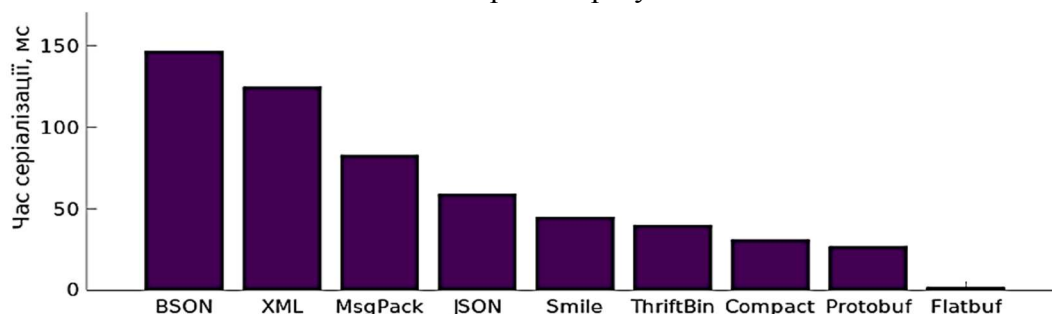


Рис. 7. Час серіалізації 1000 повідомлень, розміром по 10 Кб

Формат XML на даних розміром 10 Кб показує кращі результати, ніж на даних, розміром в 1 Кб, проте він однаково є менш ефективним щодо швидкості. З даних діаграм можна зробити висновок, що незважаючи на те, що BSON, MsgPack є бінарними форматами, швидкість їхньої роботи гірша, ніж у текстового формату JSON.

На рис. 8 зображено результати GZIP компресії повідомлень.

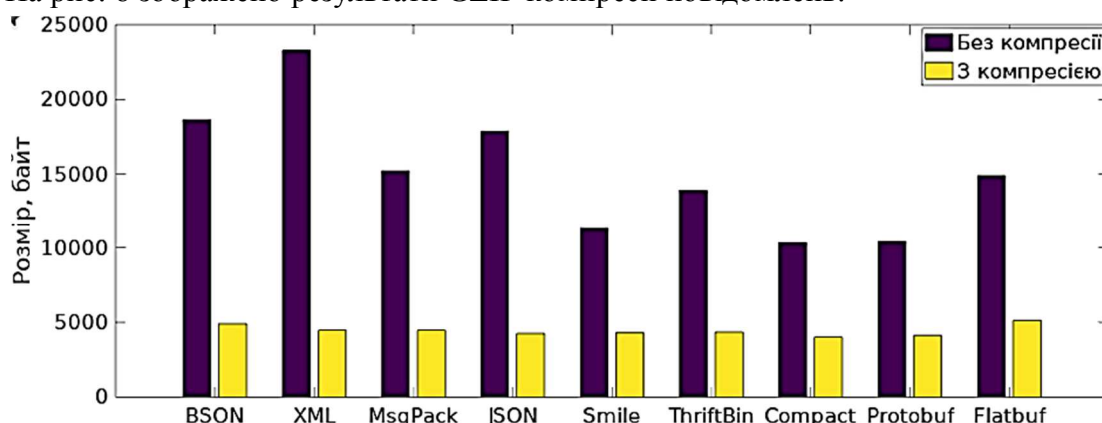


Рис. 8. Порівняння результуючого розміру повідомлень із компресії та без неї

Компресія GZIP майже повністю урівнює результуючі розміри повідомлень для всіх форматів даних. Тому якщо на першому місці за вимогами до інформаційної системи стоїть задача зменшити мережевий трафік, то гарним варіантом буде застосування компресії GZIP з текстовими простими форматами даних, такими як JSON або XML, оскільки з ними набагато легше працювати та відлагоджувати.

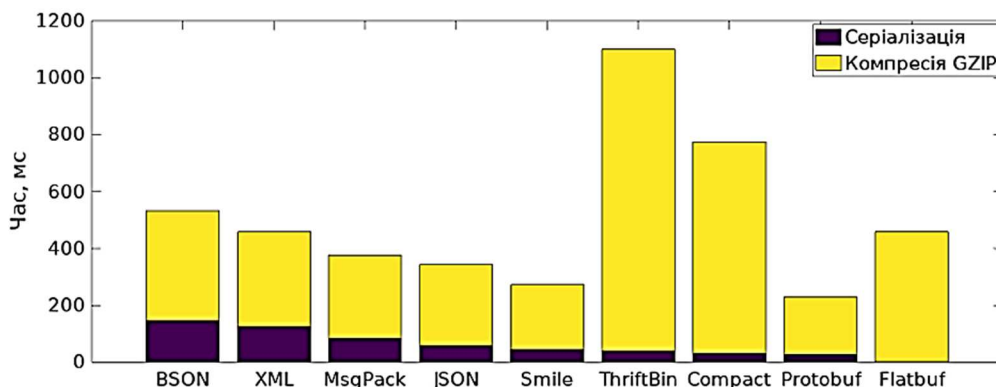


Рис. 9. Час серіалізації 1000 повідомлень по 10 Кб з GZIP компресією

Серіалізація повідомлень розміром 100 Кб (у кожній ітерації по 100 повідомлень):

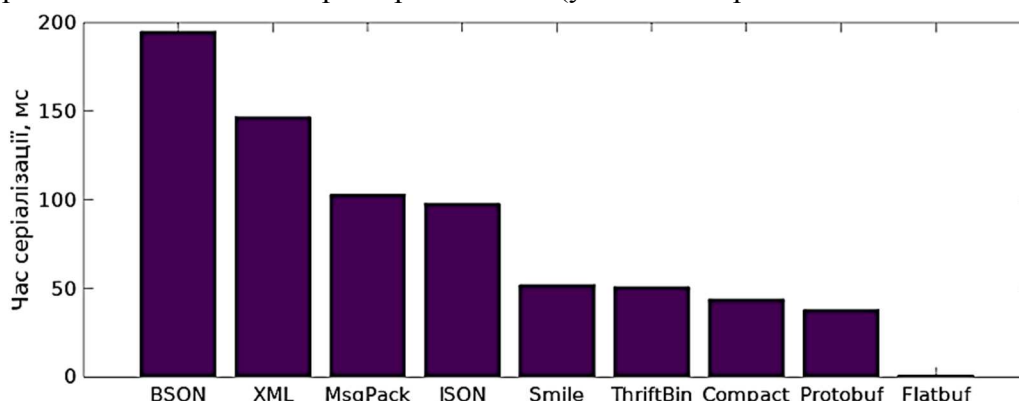


Рис. 10. Серіалізація 100 повідомлень по 100 Кб

Розмір серіалізованих повідомлень (з компресією та без неї) в цьому випадку має такий же самий вигляд, як на рис. 8, відрізняючись лише пропорціями. Тому при передачі структур даних великого розміру, різниця між результуючим розміром повідомлень, які передаються, для різних форматів стає менш помітною, як і у випадку з передачею повідомлень розміром від 10 Кб, якщо застосовувати потокову компресію.

Висновки відповідно до статті.

1. Прикладне програмне забезпечення зазвичай працює на прикладному рівні моделі OSI. Якщо на більш низьких рівнях дані розглядаються просто як масив або потік байтів із заголовком певного формату, то на прикладному рівні тісно розглядається зміст переданих даних. Крім протоколу передачі, розрізняють різні формати серіалізації та десеріалізації даних.

2. Залежно від вимог до програмного забезпечення при серіалізації/десеріалізації даних може використовуватись додаткова потокова компресія. Стандартним алгоритмом компресії нині в мережі Інтернет є GZIP, який поєднує в собі кодування Хаффмана та алгоритм LZ77.

3. Компресія значно збільшує час, необхідний на серіалізацію даних та створює додаткове навантаження на обчислювальні ресурси системи. Тому треба її застосовувати з обережністю. Компресія може дати значний вииграш, якщо вона застосовується до текстових даних, або якщо масиви даних передаються в напрямку від високопродуктивного хосту до менш продуктивного (оскільки декомпресія менш вимоглива до ресурсів), або якщо канал передачі має низьку пропускну здатність.

4. Не всі бінарні формати серіалізації показують кращі характеристики, аніж текстові. Зокрема, з цього дослідження можна зробити висновок, що такими є формати BSON та MessagePack. Час, необхідний на серіалізацію та десеріалізацію у ці формати більший, аніж у JSON, незалежно від розміру структури. Розмір серіалізованих повідомлень у BSON в більшості випадків більший, ніж у JSON, а розмір серіалізованих повідомлень MessagePack зазвичай не нижче 80 % від розміру серіалізованих повідомлень у форматі JSON. При застосуванні компресії розміри повідомлень, серіалізованих у BSON, MessagePack та JSON майже не відрізняються. Різниця стає менш помітною зі збільшенням розміру повідомлення, яке серіалізується.

5. Програмний стек Apache Thrift значно знижує швидкість серіалізації і десеріалізації даних при застосуванні потокової компресії, при цьому розмір серіалізованих повідомлень залишається майже без змін. Тому не рекомендується застосовувати алгоритми компресії у поєднанні з програмним стеком Thrift.

6. З іншого боку, Apache Thrift показує один із кращих результатів серед аналогів, як за швидкістю обробки даних, так і за розміром серіалізованих структур. При цьому він значно зручніший у використанні, аніж Protocol Buffers і Flat Buffers, та дозволяє вести розробку алгоритмів із меншими затратами часу та людських ресурсів.

7. З огляду на те, що текстові масиви даних значно краще піддаються компресії, пропонується підхід до створення бінарного протоколу з розділенням бінарних даних від текстових та частковою компресією лише текстових даних. Це дозволить як зменшити час, необхідний на компресію/декомпресію, так і зменшити розміри серіалізованих повідомлень.

8. Чим більший об'єм даних, до яких застосована компресія, тим менш помітна різниця між розміром результуючих повідомлень для різних форматів даних. Тому час, необхідний на передачу даних також буде майже однаковим, оскільки пропускну здатність каналу не залежить від внутрішньої структури повідомлень. Однак, з іншого боку, як уже було сказано у п. 3, при цьому значно збільшується час на серіалізацію. Тому для повної картини необхідно дослідити наявні моделі та застосувати їх для порівняння швидкості передачі даних, серіалізованих різними форматами, з урахуванням швидкодії апаратного забезпечення та пропускну здатності каналу.

Список використаних джерел

1. Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology: 2016-2021 / Cisco Public, 2017.
2. Andrew M. Odlyzko. Internet traffic growth: Sources and implications. *Proceedings of SPIE: The International Society for Optical Engineering*, University of Minnesota, USA, 2003.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

3. Kazuaki Maeda. Performance evaluation of object serialization libraries in XML, JSON and binary formats. *Second International Conference on Digital Information and Communication Technology and its Applications (DICTAP)*, 2012. P. 177–182.
4. S. Kami Makki. A comparison of data serialization formats for optimal efficiency on a mobile platform. *Proceedings of the 6th International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication*, 2012. No. 48. DOI: 10.1145/2184751.2184810.
5. Rama Chawla. Object Serialization Formats and Techniques a review. *Global Journal of Computer Science and Technology Software*, Global Journals Inc., 2013. Vol. 13, Issue 6.
6. Carrera D., Gustavo A., Rosales J. Optimizing Binary Serialization with an Independent Data Definition Format / *International Journal of Computer Applications*. 2018. Vol. 180. No. 28.
7. Canggih Puspo Wibowo. Evaluation of Protocol Buffers as Data Serialization Format for Microblogging Communication. *International Conference on Informatics for Development, At Yogyakarta, Indonesia*, 2011. P. 40–43.
8. Gaurav Goyal, Karanjit Singh, Ramkumar K. R. A detailed analysis of data consistency concepts in data exchange formats (JSON & XML). *International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA)*. 2017. P. 72–77.
9. Extensible Markup Language P World Wide Web Consortium. URL: <https://www.w3.org/XML>.
10. ECMA-404 The JSON Data Interchange Standard, 2017. URL: <http://www.ecma-international.org/publications/files/ECMA-ST/ECMA-404.pdf>.
11. BSON Spec. BSON (Binary JSON): Specification. URL: <http://bsonspec.org/spec.html>.
12. FasterXML. Smile Data Format. URL: <https://github.com/FasterXML/smile-format-specification>.
13. Sadayuki Furuhashi. MessagePack. URL: <https://msgpack.org>.
14. Google Developers. Protocol Buffers: Developer Guide. URL: <https://developers.google.com/protocol-buffers/docs/overview>.
15. Flat Buffers Internals. URL: https://google.github.io/flatbuffers/flatbuffers_internals.html.
16. Apache Software Foundation. Apache Thrift. URL: <https://thrift.apache.org>.
17. L. Peter Deutsch. DEFLATE Compressed Data Format Specification version 1.3. RFC 1951. URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc1951>.
18. Mamta Sharma. Compression Using Huffman Coding. *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*. 2010. Vol. 10, No. 5. P. 133–140.
19. David Huffman. A Method for the Construction of Minimum-Redundancy Codes. *Proceedings of the IRE*. 1952. Vol. 40, Issue 9, P. 1098–1952.
20. Ziv J., Lempel A. A Universal Algorithm for Sequential Data Compression. *IEEE Transactions on information theory*. 1977. Vol. IT-23, No. 3. P. 337–343.

References

1. *Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology: 2016-2021*. Cisco Public, 2017.
2. Andrew M. Odlyzko (2003). Internet traffic growth: Sources and implications. *Proceedings of SPIE: The International Society for Optical Engineering*, University of Minnesota, USA.
3. Kazuaki Maeda (2012). Performance evaluation of object serialization libraries in XML, JSON and binary formats. *Second International Conference on Digital Information and Communication Technology and its Applications (DICTAP)* (pp. 177–182).
4. S. Kami Makki (2012). A comparison of data serialization formats for optimal efficiency on a mobile platform. *Proceedings of the 6th International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication*, 48. DOI: 10.1145/2184751.2184810.
5. Rama Chawla (2013). Object Serialization Formats and Techniques a review. *Global Journal of Computer Science and Technology Software*, Global Journals Inc., 13 (6).
6. David Carrera (2018). Optimizing Binary Serialization with an Independent Data Definition Format / A.Gustavo, J. Rosales / *International Journal of Computer Applications*, 180 (28).
7. Canggih Puspo Wibowo (2011). Evaluation of Protocol Buffers as Data Serialization Format for Microblogging Communication. *International Conference on Informatics for Development* (pp. 40–43), At Yogyakarta, Indonesia.
8. Carrera, D., Gustavo, A., Rosales, J. (2017). A detailed analysis of data consistency concepts in data exchange formats (JSON & XML). *International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA)* (pp. 72–77).

9. *Extensible Markup Language P World Wide Web Consortium*. Retrieved from <https://www.w3.org/XML>.
10. *ECMA-404 The JSON Data Interchange Standard, 2017*. Retrieved from <http://www.ecma-international.org/publications/files/ECMA-ST/ECMA-404.pdf>.
11. *BSON Spec. BSON (Binary JSON): Specification*. Retrieved from <http://bsonspec.org/spec.html>.
12. *FasterXML. Smile Data Format*. Retrieved from: <https://github.com/FasterXML/smile-format-specification>.
13. Sadayuki Furuhashi. *MessagePack*. Retrieved from: <https://msgpack.org>.
14. *Google Developers. Protocol Buffers: Developer Guide*. Retrieved from <https://developers.google.com/protocol-buffers/docs/overview>.
15. *Flat Buffers Internals*. Retrieved from https://google.github.io/flatbuffers/flatbuffers_internals.html.
16. *Apache Software Foundation. Apache Thrift*. Retrieved from: <https://thrift.apache.org/>
17. L. Peter Deutsch. *DEFLATE Compressed Data Format Specification version 1.3*. RFC 1951. Retrieved from: <https://tools.ietf.org/html/rfc1951>
18. Mamta Sharma (2010). Compression Using Huffman Coding. *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, 10, 5, 133–140.
19. David Huffman (1952). A Method for the Construction of Minimum-Redundancy Codes. *Proceedings of the IRE*, 40 (9), 1098–1952.
20. Ziv, J., Lempel, A. (1977). A Universal Algorithm for Sequential Data Compression. *IEEE Transactions on information theory*, IT-23, 3, 337–343.

UDC 004.7

Roman Andrushchenko

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF DATA SERIALIZATION METHODS IN COMPUTER NETWORKS

Urgency of the research. Nowadays there is a high growth of traffic on the Internet and in local networks. Therefore, it's necessary to pay attention to the performance of reception/transmission processes in the network software. Software that somehow transmits data over a computer network performs serialization/deserialization of internal structures in a byte stream. These processes are necessary and can directly affect the mechanisms of communication between hosts. In the article a comparative analysis of the serialization of structured data has been done, and the influence of compression on the application layer of the OSI model is investigated. The study will improve the data transfer processes within the OSI model, taking into account the high-level structure of the transmitted data.

Target setting. The processes of transforming the internal data structures into a form acceptable for transmission over the network can affect the speed and reliability of the software. The problem is that existing software performs a significant, and sometimes redundant work while transmitting data. Also, protocols of different layers of the OSI model usually don't take into account the particulars of the data itself, considering it only as a stream of bytes, which leads to less effective results. One way to improve this situation is to determine the structural features of the data being transmitted and analyze how they affect the process of serialization and deserialization.

Actual scientific researches and issues analysis. The publications, materials of conferences in the field of information technologies on the topic of research, as well as official documentation of popular data formats and Internet standards (RFC) has been considered. The analysis of existing researches of the work of protocols of application layer and data serialization formats has been done.

Uninvestigated parts of general matters defining. Investigating the impact of the internal structure and the format of transmitted data on the performance of data transfer, taking into account standard compression methods at the application layer of the OSI model (GZIP).

The research objective. To make a comparative analysis of the performance characteristics of the serialization processes for text and binary data formats; to investigate the effectiveness of their work.

The statement of basic materials. Analyzed and tested the work of realization of text and binary data serialization formats on message sets of different sizes and different structures by the experiment.

Conclusions. The article presents the results of comparative analysis of text and binary data serialization formats. The advantages and disadvantages of using standard compression mechanisms on the application layer of the OSI model in combination with different serialization mechanisms are formulated.

Keywords. HTTP; data serialization; data compression; computer network; encoding; network software.

Fig.: 10. Tables: 1. References: 20.

Андрющенко Роман Богданович – аспірант, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Andrushchenko Roman – PhD student, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: arbamor@ukr.net

Олександр Бунке

ПЕРЕВАГИ ХМАРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ ВИКОРИСТАННІ В INTERNET OF THINGS (IOT)

Актуальність теми дослідження. Сьогоднішній вплив Internet of Things (IoT) на людське життя є таким же значущим, як і мережа Інтернет в останні десятиліття, тому IoT можна вважати «Інтернет-next». IoT – це мережа фізичних об'єктів, які містять вбудовані технології для спілкування, визначення або взаємодії з їхнім внутрішнім станом або зовнішнім середовищем і злиттям ефективних бездротових протоколів, поліпшених датчиків, більш дешевих процесорів і зарекомендованих компаній, що розробляють необхідне програмне забезпечення для управління й додатки основного напрямку дії IoT. Інтелектуальні середовища і Smart Platforms утворюють інтелектуальну мережу, в якій підтримуються користувачі в професійній, домашній або суспільній сфері життя. Тому розгляд переваг хмарних технологій при використанні в Internet of Things (IoT) є актуальним питанням.

Постановка проблеми. Оскільки є безліч платформ Internet of Things (IoT), необхідно виявити переваги хмарних технологій при використанні в Internet of Things (IoT).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У результаті проведеного аналізу встановлено, що початком сучасного етапу розвитку хмарних технологій є запуск у 2006 році компанією Amazon.com сервісу хмарних обчислень Elastic Compute Cloud (EC2) і онлайн-оховища файлів Simple Storage Service (S3) та проаналізовані існуючі платформи IoT.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Розгляд хмарних технологій вівся і до теперішнього часу, але переваги застосування хмарних технологій при використанні в Internet of Things (IoT) не були досліджені.

Постановка завдання. У роботі на основі аналізу хмарних технологій необхідно встановити їхні переваги при використанні в Internet of Things (IoT).

Виклад основного матеріалу. Встановлено, що основними перевагами при застосуванні хмарних технологій при використанні в Internet of Things, що включають багатofункціональність і зручність використання, є: можливість необмеженого доступу, мобільність, економічність, висока технологічність, гнучкість, достатньо-високий рівень безпеки даних.

Висновки відповідно до статті. У роботі на основі аналізу хмарних технологій встановлено їхні переваги при використанні в Internet of Things (IoT). Визначено, що хмарні технології дають змогу використовувати об'єднані ресурси зберігання й обчислювальні ресурси та забезпечувати високу надійність служб хмарних сховищ і ефективних послуг хмарних обчислень в IoT. Інтеграція хмарних обчислень і IoT свідчить про наступний великий стрибок у світі Інтернету. Нові додатки, створені на основі цієї комбінації, відомі як IoT Cloud, відкривають нові можливості для бізнесу та досліджень. Така комбінація представляє нову парадигму майбутнього мультимережевої взаємодії і відкритої сервісної платформи для всіх користувачів.

Ключові слова: хмарні технології; Internet of Things; обчислення; сервер; послуга; програмне забезпечення; платформа. Бібл.: 16.

Актуальність теми дослідження. Сьогоднішній вплив Internet of Things (IoT) на людське життя є таким же значущим, як і мережа Інтернет в останні десятиліття, тому IoT можна вважати «Інтернет-next». У число технологій IoT входять датчики і виконавчі механізми, бездротова сенсорна мережа (WSN), інтелектуальне й інтерактивне пакування (I2Pack), вбудована система реального часу, мобільний доступ в Інтернет, хмарні обчислення, радіочастотна ідентифікація (RFID), Machine-to-Machine (M2M) комунікація, людино-машинна взаємодія (HMI), проміжне програмне забезпечення, сервіс-орієнтована архітектура (SOA), корпоративна інформаційна система (EIS), інтелектуальний аналіз даних тощо [2; 3; 6]. IoT – це мережа фізичних об'єктів, які містять вбудовані технології для спілкування, визначення або взаємодії з їх внутрішнім станом або зовнішнім середовищем і злиттям ефективних бездротових протоколів, поліпшених датчиків, більш дешевих процесорів і зарекомендованих компаній, що розробляють необхідне програмне забезпечення для управління й додатки основного напрямку дії IoT. Інтелектуальні середовища і Smart Platforms утворюють інтелектуальну мережу, в якій підтримуються користувачі в професійній, домашній або суспільній сфері життя.

Постановка проблеми. Крім надання більш розумних рішень для будинків і житлових співтовариств, IoT також використовується як інструмент в бізнес-середовищі в різних галузях промисловості. Однак з огляду на кількість великих даних, які генерує IoT, існує велике навантаження на інтернет-інфраструктуру [2; 4; 7]. Це змушує підприємства й організації шукати варіант, який зменшив би це навантаження.

Хмарні обчислення пов'язані з постачанням обчислювальної потужності, сховищем бази даних, систем та ІТ-ресурсів за запитом. Це дозволяє організаціям використовувати

ти обчислювальні ресурси, такі як віртуальна машина, замість створення обчислювальної інфраструктури у своїх приміщеннях.

Сьогодні хмарні обчислення проникли в основну сферу ІТ та їхню інфраструктуру [2; 5; 6; 12; 14]. Багато технологічних гігантів, такі як Amazon, Alibaba, Google і Oracle, створюють інструменти машинного навчання за допомогою хмарних технологій для пропозиції широкого спектра рішень для компаній та індивідуальних користувачів по всьому світу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Хмарні технології дозволяють використовувати об'єднані ресурси зберігання й об'єднані обчислювальні ресурси, а також забезпечити високу надійність служб хмарних сховищ IoT і ефективних послуг хмарних обчислень для користувачів. Обсяг даних, які отримуються за допомогою технології хмарних обчислень, дуже великий. Службам хмарних обчислень спочатку необхідно створити велику кількість серверів обчислювальних ресурсів, а потім впорядковано зв'язати їх в архітектуру хмарних обчислень [2; 6; 13].

Технологія хмарних обчислень може розподіляти величезні дані в розподіленій обчислювальній системі. За допомогою віртуального розгортання сервера хмарних обчислень в нього можна перенести робоче навантаження, а локальна система не зможе встановлювати різні прикладні програми або системи [7; 15]. Завдання запуску програми не повинне лягати на локальний комп'ютер, оскільки використовується комп'ютерний кластер у хмарних обчисленнях, щоб замінити локальний комп'ютер для виконання завдання. Проте на локальний комп'ютер потрібно тільки встановити певний додаток, через який буде реалізовано віддалений запуск програм і обчислювальних функцій. З одного боку, можна знизити фінансові витрати за допомогою цієї технології, з іншого – підвищити ефективність функціонування і скоротити терміни виконання робіт [7].

Система архітектури хмарних технологій розділена на інфраструктуру як послугу (IaaS), платформу як послугу (PaaS), програмне забезпечення як послуга (SaaS) і рівень управління [2; 11]. Три верхні рівні – це горизонтальний технологічний рівень архітектури хмарних обчислень, який використовується для надання користувачам високоефективних обчислювальних ресурсів і призначений для користувача інтерфейсу. Крім того, рівень управління забезпечує підтримку й обслуговування управління інфраструктурою, платформою і службами програмного забезпечення [15].

IaaS є основою для нормальної роботи всієї архітектури хмарних обчислень. Це відбувається завдяки створенню великої кількості комп'ютерних серверів, серверів зберігання і серверів мережевого зв'язку, а також до виклику різних серверів ресурсів відповідно до потреб різних користувачів, а також надає обчислювальні послуги, послуги зберігання і послуги мережевого зв'язку різним користувачам [2; 15].

PaaS – це операційна система віртуального комп'ютера, яка надає користувачам послуги з розробки програм і кешування, є частиною проміжного програмного забезпечення архітектури хмарних обчислень і відіграє сполучну роль [12; 15].

SaaS ґрунтується на технології мережевих комунікацій для зв'язку зі службами хмарних обчислень на основі інтернет-технологій. При використанні відповідних ресурсів загальної архітектури об'єднаних ресурсів хмарних обчислень можна отримати відповідні послуги для задоволення різних вимог користувачів [5].

Рівень управління хмарними обчисленнями надає послуги управління для вищезазначених трьох рівнів, при цьому можна використовувати технічне обслуговування управління обліковими записами, моніторинг угод про рівень обслуговування (SLA), управління виставленням рахунків, управління безпекою, балансування навантаження й управління експлуатацією і технічним обслуговуванням, щоб підтримувати нормальну роботу всієї системи хмарних обчислень з метою підвищення ефективності хмарних обчислень тощо [2].

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Початком сучасного етапу розвитку хмарних технологій прийнято вважати запуск у 2006 році компанією Amazon.com [1] сервісу хмарних обчислень Elastic Compute Cloud (EC2) і онлайнного сховища файлів Simple Storage Service (S3).

Сьогодні IoT Amazon Web Services (AWS) включає безліч хмарних сервісів. Основними особливостями платформи AWS IoT є [1]: реєстр для розпізнавання пристроїв; комплект розробки програмного забезпечення для пристроїв; система безпеки; механізм правил для оцінки вхідних повідомлень.

Платформа IoT AWS значно полегшує розробникам підключення датчиків для різних додатків, від автомобілів до турбін і ламп розумного будинку. Сфера дії AWS IoT піднята на новий рівень, а сам постачальник встановив партнерські відносини з виробниками обладнання, такими як Intel, Texas Instruments, Broadcom і Qualcomm, для створення стартових наборів, сумісних з їхньою платформою; стандарт EC2 є де-факто стандартом хмарних обчислень [11].

Наступними за Amazon були запропоновані хмарні платформи Google і Microsoft. Відома їхня перша платформа, яка мала комерційний успіх, це IaaS-система Eucalyptus [2; 11], яка функціонує і донині, маючи інструменти для створення «хмар».

Microsoft має IoT-платформу Azure IoT, а сам виробник зацікавлений у випуску продуктів для IoT, оскільки вважає це перспективним [2; 3; 6]. Для ініціативи платформи IoT, сумісної з хмарними сервісами Microsoft Azure, пропонується пакет IoT Azure. Функції, включені в цю платформу, містять: приховування пристроїв; движок правил; реєстр особистих даних; інформаційний моніторинг.

Для обробки величезної кількості інформації, що генерується датчиками, пакет Azure IoT поставляється з Azure Stream Analytics для обробки величезних обсягів інформації в режимі реального часу [2; 3; 6].

Хмарна платформа Google випустила IoT Platforms-Google Cloud Platform [2; 3; 6]. Володіючи комплексною платформою, хмара Google є однією з кращих платформ IoT, які існують нині. Маючи здатність обробляти величезну кількість даних за допомогою Cloud IoT Core, Google виділяється на тлі інших. При цьому розширена аналітика здійснюється завдяки Google Query і Cloud Data Studio.

Деякі з функцій платформи Google Cloud – це: прискорення свого бізнесу; прискорення своїх пристроїв; зниження витрат із хмарним сервісом; партнерська екосистема [2; 3; 6].

Наступною топовою платформою IoT є IoT ThingWorx, яка є провідною, в інформаційній галузі, технологічною платформою IoT [2; 3; 6]. Це дозволяє новаторам швидко створювати і розгортати додатки, рішення і досвід, які змінюють правила гри, для сучасного інтелектуального пов'язаного світу.

Thingworx – це платформа IoT, призначена для розробки корпоративних додатків. Сервіс передбачає такі функції, як: просте підключення пристроїв до платформи; усунення складнощів при розробці додатків IoT [2; 3; 6]; обмін платформою серед розробників для швидкої подальшої розробки; інтегроване машинне навчання для автоматизації складної аналітики великих даних.

IBM також має свою платформу Watson. IBM Watson – це платформа IoT, яка підтримується гібридною хмарною платформою IBM PaaS [2; 3; 6]. Bluemix, Watson IoT дозволяє розробникам легко розгортати додатки IoT. У запропонованому сервісі IBM Watson закладені функції: управління пристроєм; безпечний зв'язок; обмін даними в реальному часі; сховище даних. Крім того, нещодавно були додані дані датчика і служби даних про погоду.

Samsung Electronics запустила Artik, яка надає наскрізну платформу IoT для продуктів і послуг наступного покоління. Samsung Artik відомий тим, що забезпечує повну безпеку продуктів, якою часто нехтують. З такими сервісами, як Artik Module, Cloud, Security і екосистема, Samsung надає платформу, яка забезпечує повну безпеку. Artik надає швидку та відкриту платформу, яка відповідає за розробку й управління продуктами користувачів.

Платформа Artik пропонує такі можливості: хмара; різні модулі; безпеку із захистом від злому.

Треба згадати і про MaaS-платформами, які включають близько двох десятків програм [3; 9] з дуже різними функціями. Під час розробки компанією Canonical платформи Juju [9] у 2012 році з'явився термін MaaS.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Хмарні технології, а також IoT працюють над підвищенням ефективності повсякденних завдань, і обидві мають взаємодоповнюючі відносини. З одного боку, IoT генерує багато даних, а з іншого боку, хмарні технології прокладають шлях для цих даних. Багато хмарних провайдерів використовують це для надання моделі оплати в міру використання, коли клієнти платять за конкретні використовувані ресурси. Крім того, хмарний хостинг як послуга додає цінність для IoT-стартапів, забезпечуючи економію за рахунок масштабу для скорочення загальної структури витрат.

На додаток до цього хмарні технології також забезпечують кращу спільну роботу для розробників, що є звичайною справою в просторі IoT. Завдяки тому, що розробники можуть зберігати й отримувати доступ до даних віддалено, хмарні технології дозволяють розробникам без затримок реалізовувати проекти. Крім того, зберігаючи дані у хмарі, компанії IoT можуть отримати доступ до величезної кількості різних даних.

Хмарні технології засновані на принципах швидкості й масштабу, а додатки IoT побудовані на принципі мобільності й дуже поширених мереж. Отже, дуже важливо, щоб як хмарні технології, так і IoT формували хмарні додатки IoT, прагнучи максимально використовувати свою комбінацію. Цей взаємозв'язок привів до успіху IoT [7].

Хмарні технології дозволяють IoT виходити за межі звичайних пристроїв, таких як кондиціонери, холодильники тощо. Це пов'язано з тим, що хмара має настільки велике сховище, що усуває залежності від локальної інфраструктури. З ростом мініатюризації і переходом 4G на більш високі швидкості Інтернету, хмарні технології дають змогу розробникам розвантажувати швидкі обчислювальні процеси.

Роль IoT у використанні мобільності величезна, однак його можливості були б неповними без забезпечення безпеки. Хмарні технології дозволяють IoT бути більш безпечним, завдяки профілактичному й коригуючому контролю. Хмарні технології в IoT надали користувачам строгі заходи безпеки, забезпечивши ефективні протоколи аутентифікації й шифрування. Крім цього, для продуктів IoT стало можливим управління і захист особистості користувачів за допомогою біометрії. Все це можливо через хмарну безпеку.

Мета статті. У роботі на основі аналізу хмарних технологій необхідно встановити їхні переваги при використанні у Internet of Things (IoT).

Виклад основного матеріалу. Багато інновацій у сфері IoT орієнтовані на послуги хостингу «включай і працюй». Ось чому хмарні технології ідеально підходять для IoT. Хостинг-провайдери не повинні залежати від масивного обладнання або навіть будь-якого іншого обладнання, яке не підтримуватиме гнучкість IoT-пристроїв. Завдяки хмарним технологіям, більшість хостинг-провайдерів можуть надати своїм клієнтам готову модель, усуваючи для них вхідні бар'єри.

Хмарні технології діють як міст у формі посередника чи посередника в спілкуванні, коли справа доходить до IoT. Багато потужних API-інтерфейсів, такі як Cloudflare, CloudCache і Dropstr, підтримуються хмарним зв'язком, що дозволяє легко підключатися до смартфонів. Це дає їм змогу спілкуватися один з одним, а не тільки з людьми, що, по суті, є принципом хмарних технологій в IoT.

Було б справедливо сказати, що хмарні технології можуть прискорити зростання IoT. Однак розгортання хмарних технологій також має певні проблеми і недоліки. Це не тому, що хмара є технологічною помилкою, а поєднання хмарних технологій і IoT може обтяжувати користувачів деякими перешкодами.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Обробка великої кількості даних може бути дуже складною, особливо коли на зображенні присутні мільйони пристроїв. Це пов'язано з тим, що на меті поставлена загальна продуктивність додатків. Отже, відстеження руху NoSQL може бути корисним, але це не перевірялося і не перевіряється в довгостроковій перспективі. Ось чому для хмарних технологій немає надійного методу управління великими даними.

Хмарні технології і IoT включають міжмашинний зв'язок між безліччю різних типів пристроїв, що мають різні протоколи, а управління такого роду змінами може бути складним, оскільки більшість сфер застосування не пов'язані з мобільністю. Нині Wi-Fi і Bluetooth використовуються як рішення для обмеження доступу, щоб певною мірою сприяти мобільності.

Сенсорні мережі посилили переваги IoT. Ці мережі дозволяють користувачам вимірювати, робити висновки і розуміти деякі показники з навколишнього середовища. Проте своєчасна обробка великої кількості даних такого датчика залишається серйозною проблемою, незважаючи на те, що хмарні технології надають нову можливість агрегування даних датчиків з одночасним перешкоджанням прогресу через проблеми безпеки і конфіденційності.

Підсумовуючи, треба зауважити, що до основних переваг застосування хмарних технологій при використанні у Internet of Things, які зумовлені багатофункціональністю і зручністю використання, належать:

- можливість необмеженого доступу: забезпечується повсюдна доступність до даних, які розташовуються у хмарній інфраструктурі, при застосуванні будь-яких пристроїв, що мають підключення до мережі Інтернет;
- мобільність: для користувача немає прив'язки до місця доступу даних, але необхідно підключення до мережі Інтернет;
- економічність: користувач не несе фінансових витрат, які пов'язані з придбанням дорогої обчислювально-потужної техніки, а також витрат на програмне забезпечення та обслуговування системи загалом;
- високу технологічність: користувач може використовувати великий обсяг обчислювальних потужностей, пов'язаних зі зберіганням, аналізом і обробкою даних;
- гнучкість: хмарні технології дозволяють легко виконати масштабованість, що відкриває можливість користуватися ресурсами та сервісами в міру їх необхідності;
- достатній рівень безпеки даних: забезпечується застосуванням криптографічних засобів і захищених протоколів, за допомогою яких виконується передача даних.

Наведені переваги хмарних технологій підтверджують зручність і безпеку їх використання в IoT, що дозволяє їх впровадити в будь-яку сферу діяльності людини.

Висновки відповідно до статті. У роботі на основі аналізу хмарних технологій встановлено їхні переваги при використанні у Internet of Things (IoT). Установлено, що хмарні технології дозволяють використовувати об'єднані ресурси зберігання й обчислювальні ресурси та забезпечувати високу надійність служб хмарних сховищ і ефективних послуг хмарних обчислень в IoT.

Основними перевагами застосування хмарних технологій при використанні в Internet of Things, що включають багатофункціональність і зручність використання, є можливість необмеженого доступу, мобільність, економічність, висока технологічність, гнучкість, достатньо високий рівень безпеки даних.

Інтеграція хмарних обчислень і IoT свідчить про наступний великий стрибок у світі Інтернету. Нові додатки, створені на основі цієї комбінації, відомі як IoT Cloud, відкривають нові можливості для бізнесу та наукових досліджень. Така комбінація представляє нову парадигму майбутнього мультимережевої взаємодії і відкритої сервісної платформи для всіх користувачів.

Список використаних джерел

1. Amazon Web Services (AWS) – cloud computing services. URL: <http://aws.amazon.com/ru/>, accessed 29.01.2019.
2. Bottomly J. The hype around containers. *Network solutions magazine / LAN*, 10. 2014. URL: <http://www.osp.ru/lan/2014/10/13043208>.
3. Cheryak L. HPC fifteen years of evolution. *Open systems*. 2008. № 4. URL: <http://www.osp.ru/os/2008/04/5114370>.
4. Evans D. The internet of things: How the next evolution of the internet is changing everything. *CISCO white paper*. 2011. № 1(2011). P. 1–11.
5. Internet of things: converging technologies for smart environments and integrated ecosystems / Vermesan O., Friess P. (Eds.). River Publishers, 2013.
6. An integrated approach to snowmelt flood forecasting in water resource management / Fang S., et. al. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2014. № 10(1). P. 548–558.
7. Gubbi J., Buyya R., Marusic S., Palaniswami M. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future generation computer systems*. 2013. № 29 (7). P. 1645–1660.
8. Eucalyptus H. H. *Open source hybrid cloud software for AWS users*. 2015. URL: <http://www8.hp.com/us/en/cloud/helion-eucalyptus-overview.html>.
9. *MAAS: Metal As A Service*. URL: <https://maas.ubuntu.com/docs>.
10. Health monitoring and management using Internet-of-Things (IoT) sensing with cloud-based processing: Opportunities and challenges / Hassanalieragh M., et. al. *2015 IEEE International Conference on Services Computing*. 2015, June. P. 285–292.
11. *Open Cloud Computing Interface*. URL: <http://occi-wg.org>.
12. Egli, P. R. (2015). An introduction to MQTT, a protocol for M2M and IoT applications. *Indigoo.com*.
13. Rao B. P., Saluia P., Sharma N., Mittal A., Sharma S. V. Cloud computing for Internet of Things & sensing based applications. *Sensing Technology (ICST), 2012 Sixth International Conference on*. 2012, December. P. 374–380.
14. Reez J. Cloud computing. St. Petersburg: BHV-Petersburg. 2011.
15. Liu T., Duan Y. Application of cloud computing in the emergency scheduling architecture of the Internet of Things. *Software Engineering and Service Science (ICSESS), 2015 6th IEEE International Conference on*. 2015, September. P. 1063–1067.
16. *What is xCAT?* URL: <http://xcat.org/>, accessed 29.01.2019.

References

1. Amazon Web Services (AWS) – cloud computing services. Retrieved from <http://aws.amazon.com/ru/>, accessed 29.01.2019.
2. Bottomly, J. (2014). The hype around containers. *Network solutions magazine / LAN*, 10. Retrieved from <http://www.osp.ru/lan/2014/10/13043208>.
3. Cheryak, L. (2008). HPC fifteen years of evolution. *Open systems*, 4. Retrieved from <http://www.osp.ru/os/2008/04/5114370>.
4. Evans, D. (2011). The internet of things: How the next evolution of the internet is changing everything. *CISCO white paper*, 1(2011), 1–11.
5. Vermesan, O., & Friess, P. (Eds.) (2013). *Internet of things: converging technologies for smart environments and integrated ecosystems*. River Publishers.
6. Fang, S., Xu, L., Pei, H., Liu, Y., Liu, Z., Zhu, Y., ... & Zhang, H. (2014). An integrated approach to snowmelt flood forecasting in water resource management. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10(1), 548–558.
7. Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future generation computer systems*, 29 (7), 1645–1660.
8. Eucalyptus, H. H. (2015). *Open source hybrid cloud software for AWS users*. Retrieved from <http://www8.hp.com/us/en/cloud/helion-eucalyptus-overview.html>.
9. *MAAS: Metal As A Service*. Retrieved from <https://maas.ubuntu.com/docs>.
10. Hassanalieragh, M., Page, A., Soyata, T., Sharma, G., Aktas, M., Mateos, G., ... & Andreescu, S. (2015, June). Health monitoring and management using Internet-of-Things (IoT) sensing with

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

cloud-based processing: Opportunities and challenges. In *2015 IEEE International Conference on Services Computing* (pp. 285-292). IEEE.

11. *Open Cloud Computing Interface*. Retrieved from <http://occi-wg.org>.

12. Egli, P. R. (2015). An introduction to MQTT, a protocol for M2M and IoT applications. *Indigoo.com*.

13. Rao, B. P., Saluia, P., Sharma, N., Mittal, A., & Sharma, S. V. (2012, December). Cloud computing for Internet of Things & sensing based applications. In *Sensing Technology (ICST), 2012 Sixth International Conference on* (pp. 374-380). IEEE.

14. Reez, J. (2011). Cloud computing. St. Petersburg: BHV-Petersburg.

15. Liu, T., & Duan, Y. (2015, September). Application of cloud computing in the emergency scheduling architecture of the Internet of Things. In *Software Engineering and Service Science (ICSESS), 2015 6th IEEE International Conference on* (pp. 1063-1067). IEEE.

16. *What is xCAT?* Retrieved from <http://xcat.org/>, accessed 29.01.2019.

UDC 004.7:004.453

Oleksander Bunke

ADVANTAGES OF CLOUD TECHNOLOGIES WHEN USED IN THE INTERNET OF THINGS (IOT)

Topicality of the research. Today's influence of the Internet of Things (IoT) on human life is as significant as the Internet in recent decades, so IoT can be considered as «Internet-Next». IoT is a network of physical objects that contain embedded technologies for communication, identification or interaction with their internal state or environment, and the merging of efficient wireless protocols, improved sensors, cheaper processors and reputable companies that develop software necessary for administration and applications of the main direction of the IoT. Smart environments and Smart Platforms form an intelligent network that supports users in the professional, home or public life. Therefore, the consideration of the benefits of cloud technologies when used in the Internet of Things (IoT) is a topical issue.

Problem statement. Because there are many Internet of Things (IoT) platforms, one needs to identify the benefits of cloud-based technology when used in the Internet of Things (IoT).

Analysis of recent research and publications. As a result of the analysis, it was established that the launch of the Elastic Compute Cloud (EC2) cloud computing service and Simple Storage Service (S3) online storage by Amazon.com in 2006 was the start of the current development phase of cloud technologies, and the existing IoT platforms were analyzed.

Identification of unexplored parts of the entire problem. The cloud technology review has been ongoing to date, but the benefits of applying cloud technologies when used in the Internet of Things (IoT) have not been explored.

Setting objectives. On the basis of analysis of cloud technologies it is necessary to establish their advantages when used in Internet of Things (IoT).

Research findings (in brief). It has been established that the main advantages of cloud technologies when used in the Internet of Things, which include multifunctionality and ease of use, are: the possibility of unlimited access, mobility, cost-effectiveness, high technology, flexibility, sufficiently high level of data security.

Conclusions according to the research paper. On the basis of analysis of cloud technologies, their advantages are established when used in Internet of Things (IoT). It has been established that cloud-based technologies allow the use of unified storage and computing resources and provide high reliability of cloud storage services and efficient cloud computing services in the IoT. The integration of cloud computing and IoT points to the next big leap in the world of the Internet. New applications based on this combination, known as IoT Cloud, open up new business and research opportunities. This combination represents a new paradigm for future multi-network interactions and an open service platform for all users.

Keywords: cloud technologies; Internet of Things; computing; server; service; software; platform.

Бунке Олександр Сергійович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна).

Bunke Oleksander – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute (37 Peremohy Av., 03056 Kyiv, Ukraine).

Scopus Author ID: 54954489000

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7945-7040>

UDC 004.052.3:004.22

DOI: 10.25140/2411-5363-2019-1(15)-134-144

*Heorhii Loutskii, Artem Volokyta, Pavlo Rehida, Olexandr Goncharenko***USING EXCESS CODE TO DESIGN FAULT-TOLERANT TOPOLOGIES**

Urgency of the research. The task of increasing fault tolerance is one of the key tasks in constructing a computing system and in modernizing an already existing one. Particular attention is paid to it when building multicomputer systems or clusters. The most interesting ways to increase fault tolerance is to use the topological structure of the system to bypass the malfunction and use one or another element of the system to replace the faulty. Of course, this requires the development of a specific topology. The article deals with the development of fault-tolerant versions of popular topologies, such as quasi-quantum and hypercube, based on the excess code 0/1 /-1.

Target setting. An important part of any multicomputer system or cluster is its topological structure. This structure defines the routing of messages in the system, speed of message transmission, and level of fault-tolerance of a system. The article proposes a method for increasing fault-tolerance based on the use of excess code.

Actual scientific researches and issues analysis. Synthesis of topologies such as the hypercube or the de Bruin topology is well studied and described now, there are papers consider methods for increasing the fault-tolerance that based on usage of additional nodes that duplicate current nodes. Other papers consider using a tree-based routing to improve fault-tolerance of the system.

Uninvestigated parts of general matters defining. Now the possibilities of using excess code 0/1/-1 for creating new fault-tolerant topologies based on existing synthesis methods are unconsidered.

The research objective. The task is to describe the synthesis of fault tolerant topologies, the consideration of the possibilities of using their features and the analysis of the main characteristics in comparison with each other and with classic versions based on binary code.

The statement of basic materials. The synthesis of hypercube and de Bruin topology is described on the basis of the usual binary code and the redundant code 0/1 / -1, the possibilities of using redundancy are considered, first of all, to increase the fault-tolerance, a comparative analysis of all of these topologies is carried out.

Conclusions. The analysis of characteristics is performed, the main advantages and disadvantages of the proposed topological structures are highlighted, suggestions for their improvement are made.

Keywords: fault tolerance; de Bruin; hypercube; excess code.

Fig.: 13. Table: 7. References: 8.

Target setting. An important part of any multicomputer system or cluster is its topological structure. It describes how computing elements are interconnected. This structure defines the routing of messages in the system, speed of message transmission, and level of fault-tolerance of a system. Level of fault-tolerance represents the ability of the system to function correctly in the failure of its constituent parts. Therefore, we propose a method to improve fault tolerance, based on the usage of excess code.

Actual scientific researches and issues analysis. Synthesis of topologies such as the hypercube or the de Bruin topology (also called quasi-quantum) is well studied and described. Many papers consider methods for increasing the fault-tolerance that based on usage of additional nodes that duplicate current nodes. Other papers consider using a tree-based routing to improve fault-tolerance of the system and to prevent locks.

Uninvestigated parts of general matters defining. Now the possibilities of using excess code 0/1/-1 for creating new fault-tolerant topologies based on existing synthesis methods are unconsidered.

The research objective. The purpose of the research is a synthesis of new topologies based on quasi-quantum and hypercube topologies using an excess code for encoding nodes numbers. Also, it is necessary to make a detailed analysis of the system's characteristics and routing capabilities. Special attention will be paid to the issues of fault-tolerance.

The statement of basic materials. The task of topology synthesis defined: there are M nodes, their numbers are encoded by some code. Usually, $M = B^N$, where B – the basis of the chosen numeral system or code, N – a numeral bit capacity of nodes numbers. One of the goals of this task to get for each node all codes of its neighbors. To achieve that some transformation with node's code is used.

Basic definitions. De Bruin topology and the hypercube are quite convenient in terms of routing. In the classic version [1-4], the binary numeral system is used for encoding of nodes numbers. It means, the maximal count of nodes for N – bit code is 2^N . The difference between

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

these topologies is as follows: to synthesis de Bruin topology Shuffle transformation is used, and to synthesis hypercube Exchange is used. In the binary numeral system, these approaches looks like shift and bit's inversion respectively.

Synthesis of topology using binary code. Below, the synthesis process for each of the selected topologies in the case of N=2 and N=3 is shown.

In de Bruin topology getting of neighbor node's code performs through shifts on left and right with insertion 0 or 1 in released bit. Table 1 shows synthesis of this topology for case N = 2, table 2 – for N = 3.

Table 1

De Bruin topology synthesis for 2-bits binary code

Value	Code	Put 0 to released bit		Put 1 to released bit	
		Shift left	Shift right	Shift left	Shift right
0	00	00	00	01	10
1	01	10	00	11	10
2	10	00	01	01	11
3	11	10	01	11	11

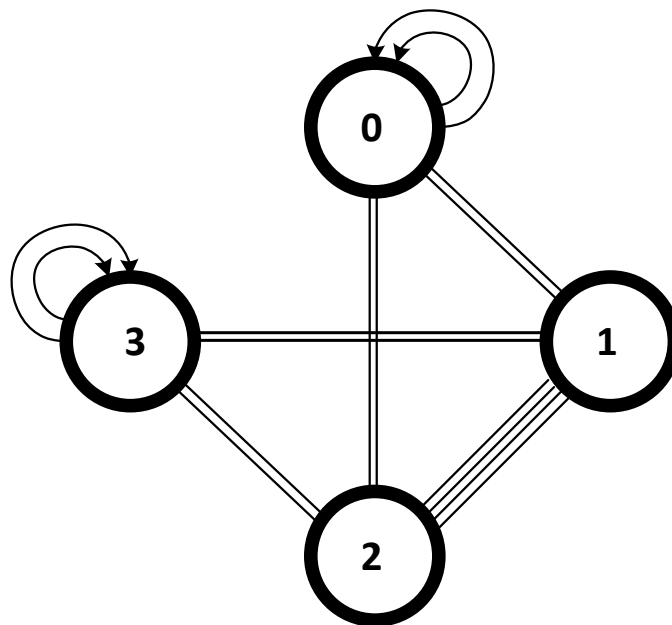


Fig. 1. De Bruin topology for N=2

Table 2

De Bruin topology synthesis for 3-bits binary code

Value	Code	Put 0 to released bit		Put 1 to released bit	
		Shift left	Shift right	Shift left	Shift right
0	000	000	000	001	100
1	001	010	000	011	100
2	010	100	001	101	101
3	011	110	001	111	101
4	100	000	010	001	110
5	101	010	010	011	110
6	110	100	011	101	111
7	111	110	011	111	111

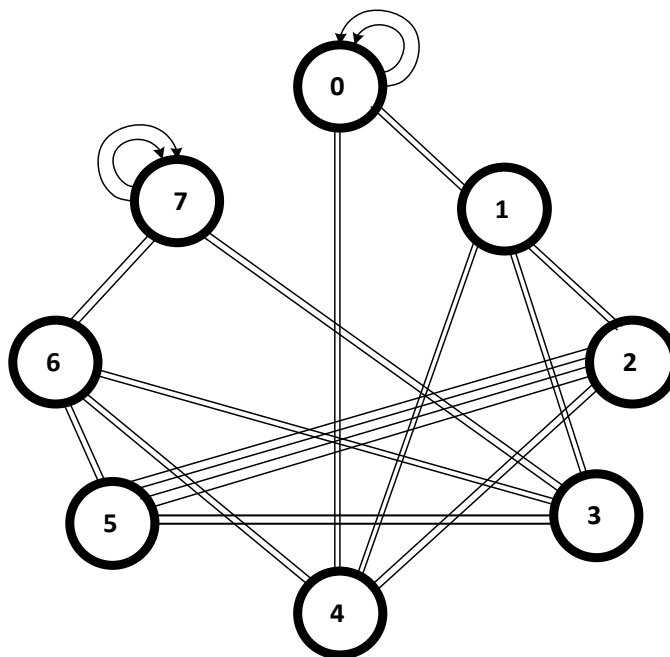


Fig. 2. De Bruin topology for $N = 3$

Analogically we can use similar for hypercube synthesis [5] but it is required to do inversions of one digit of code instead shift with insertion. It is illustrated in tables 3 and 4.

Table 3

Hypercube topology synthesis for $N=2$

Value	Code	Exchange 1st bit	Exchange 2nd bit
0	00	10	01
1	01	11	00
2	10	00	11
3	11	01	10

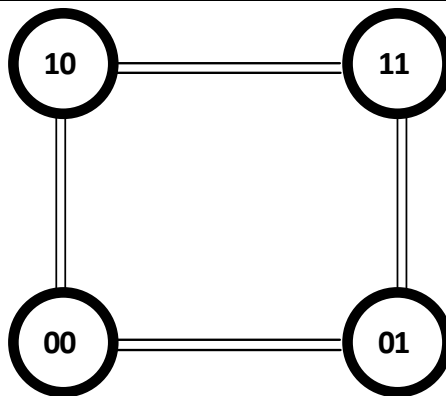


Fig. 3. Hypercube, $N = 2$

Table 4

Hypercube topology synthesis for $N=3$

Value	Code	Exchange 1st bit	Exchange 2nd bit	Exchange 3rd bit
0	000	100	010	001
1	001	101	011	000
2	010	010	000	011
3	011	011	001	010
4	100	000	110	101
5	101	001	111	100
6	110	010	100	111
7	111	011	101	110

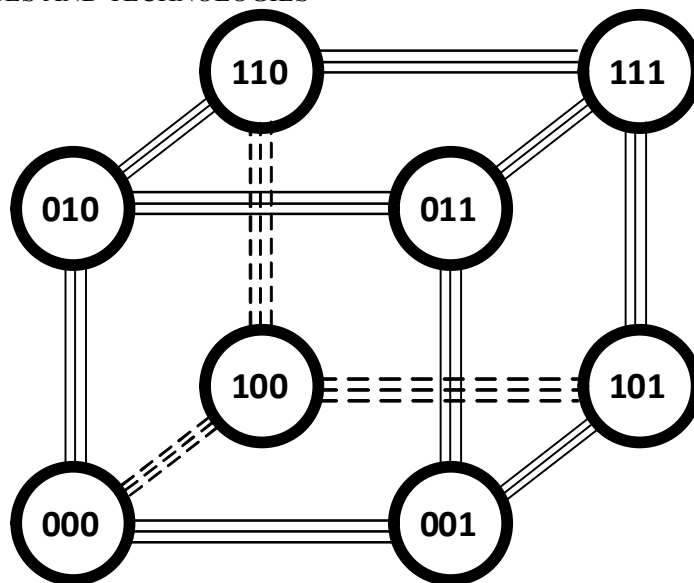


Fig. 4. Hypercube, $N = 3$

About excess code 0/1/-1. The excess code 0/1/-1 differs from the usual binary code with the presence of an additional number -1. It is denoted by the character T. All other properties, including the weight of the digits, are the same as for usual binary code. The main feature of this code is: one number in this code sometimes can be presented in several ways. For example, the number 3 in 3-digits excess code can be written as 011, 10T and 1T1. The maximal count of representations growth with a bit capacity of code. Also, unlike to usual binary code, this code includes the negative numbers.

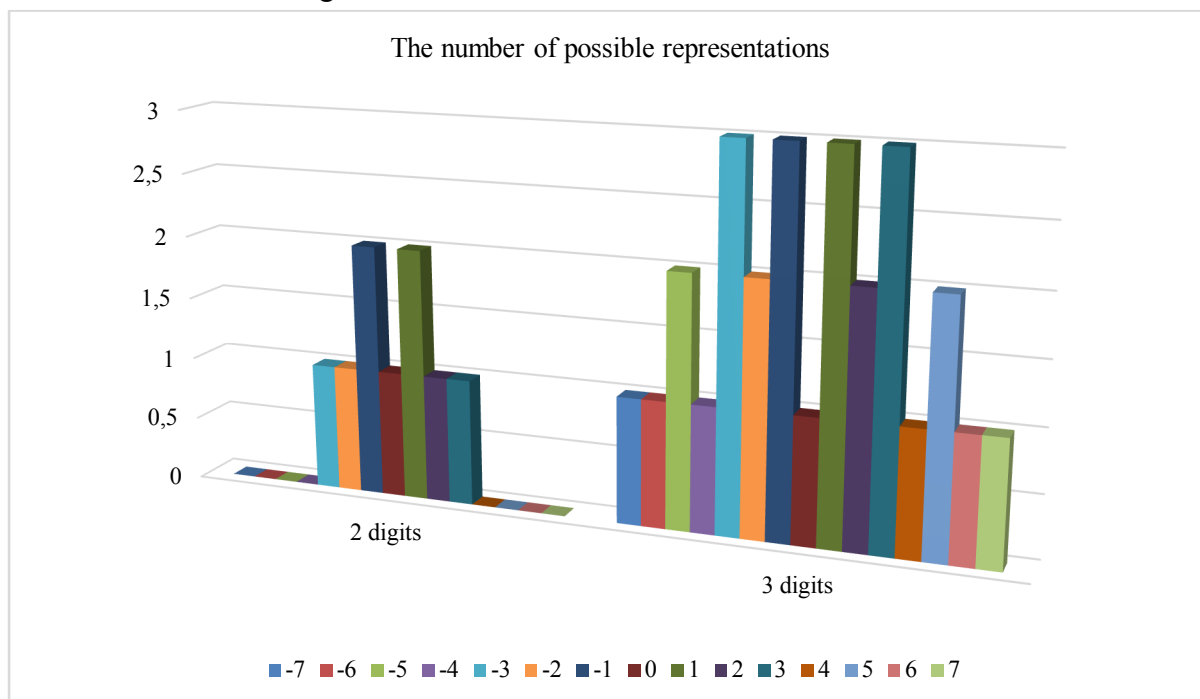


Fig. 5. Count of numbers representations on excess code with different digital capacity

Synthesis of topology using excess code. The synthesis process is similar, but it differs that digit T now is used in the process of insertion/replacement. In case of quasi-quantum topology, it used as an additional variant of insertion on shift. In case of hypercube: there are two variants of exchange for every digit, not only one. Table 5 shows de Bruin topology synthesis based on 2-digit excess code. Table 6 shows similar synthesis for hypercube.

Table 5

De Bruin topology synthesis for 2-digital excess code

Value	Code	Put 0 to released bit		Put 1 to released bit		Put T to released bit	
		Shift left	Shift right	Shift left	Shift right	Shift left	Shift right
0	00	00	00	01	10	0T	T0
1	01	10	00	11	10	1T	T0
-1	0T	T0	00	T1	10	TT	T0
2	10	00	01	01	11	0T	T1
3	11	10	01	11	11	1T	T1
1	1T	T0	01	T1	11	TT	T1
-2	T0	00	0T	01	1T	0T	TT
-1	T1	10	0T	11	1T	1T	TT
-3	TT	T0	0T	T1	1T	TT	TT

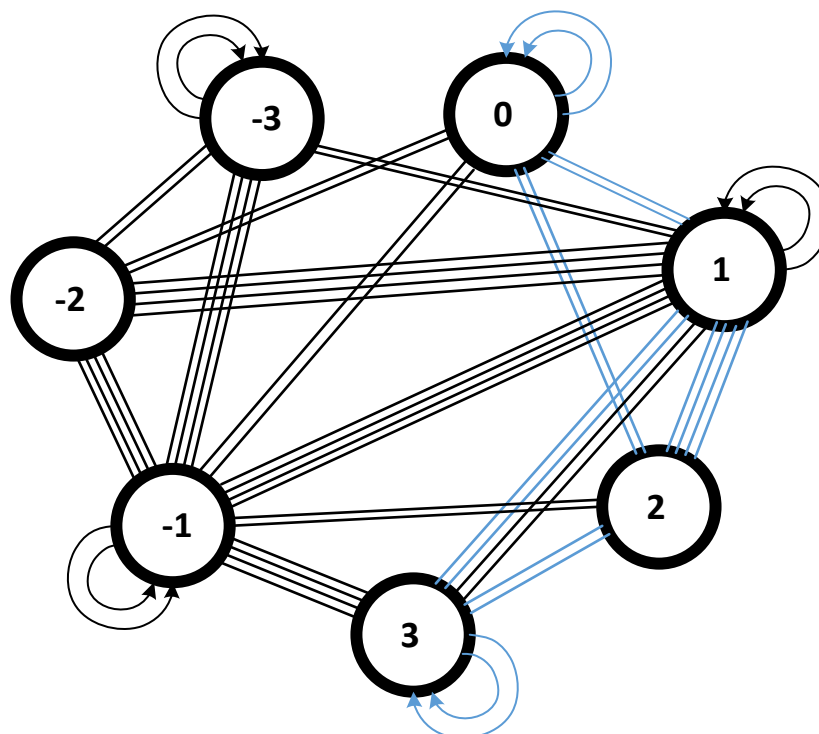


Fig. 6. De Bruin topology based on excess code, $N=2$

Table 6

Hypercube topology synthesis for 2-digital excess code

Value	Code	Exchange 1st bit		Exchange 2nd bit	
		10	T0	01	0T
0	00	10	T0	01	0T
1	01	11	T1	0T	00
-1	0T	1T	TT	00	01
2	10	T0	00	11	1T
3	11	T1	01	1T	10
1	1T	TT	0T	10	11
-2	T0	00	10	T1	TT
-1	T1	01	11	TT	T0
-3	TT	0T	1T	T0	T1

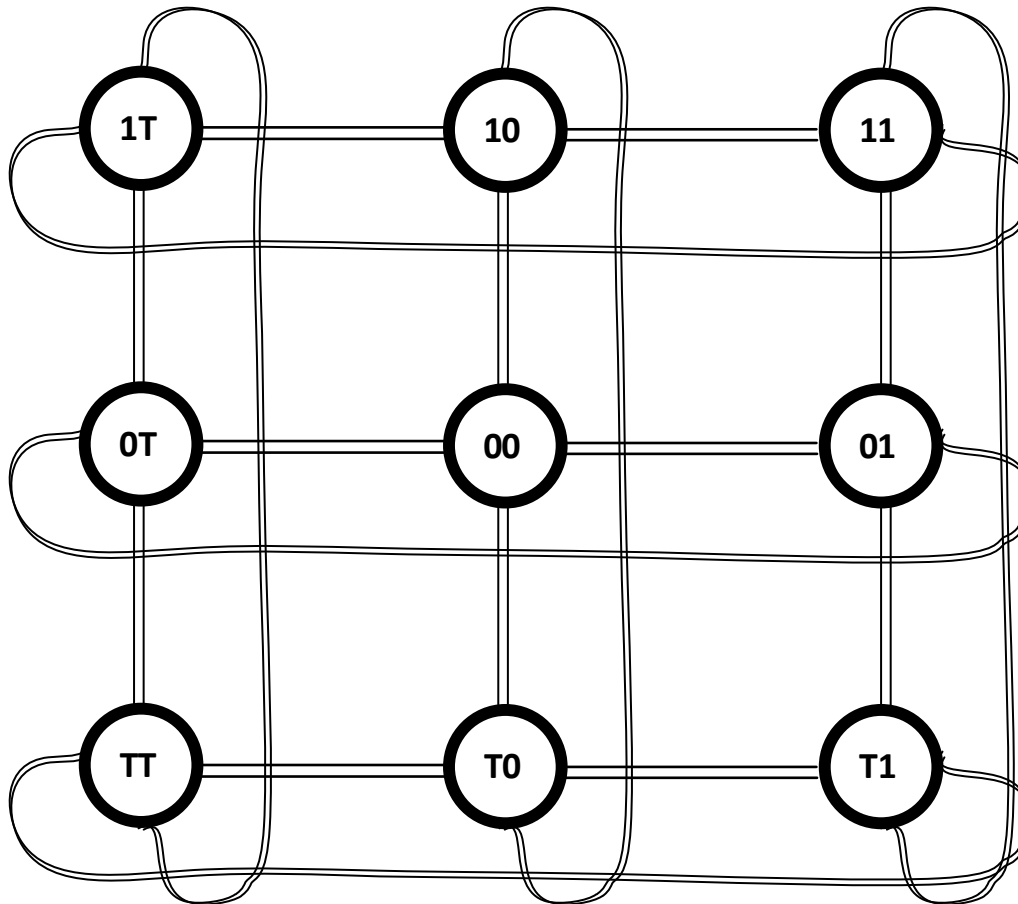


Fig. 7. Hypercube topology based on excess code, $N=2$

Using redundancy. There are several ways of using the proposed redundancy. Firstly, existing of several nodes with same numbers allows uniting those nodes in a cluster. This allows, to hide their essence from the user. In case of a node failure, another element in a cluster can take it's role. Also, the encoding allows access to each element separately. It allows to increase the system's performance in case of failure-free working through the use of additional elements.

The alternative way of using redundancy is a fault-tolerant routing [6-7], based on routing trees. The top of the tree is a node with same values of digits in the code. Those trees are constructed as follows: in case of quasi-quantum topology node's code is shifting left with insertion. In case of hypercube one digit in the code is inverted. If K -th digit been inverted on the previous step, on the next step we can invert only lower digits relative to K .

Usage of routing trees is follows: the routing program analyzes the next node on a route and if this node is busy or faulty, the transition on an alternative tree is performing. Thus, the task of bypassing the faulty nodes is solved simply and effectively. Also, this approach helps to decrease the probability of locking data transfer. If a needed node is busy while data transfer, this method allows to find free node using a transition on an alternative tree [8].

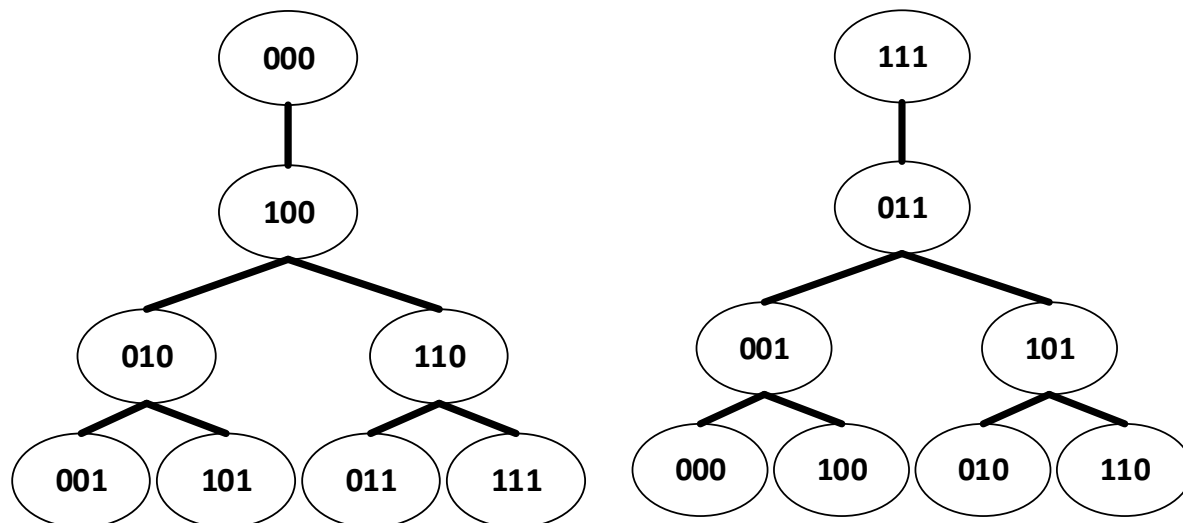


Fig. 8. Routing trees for classic de Bruin topology

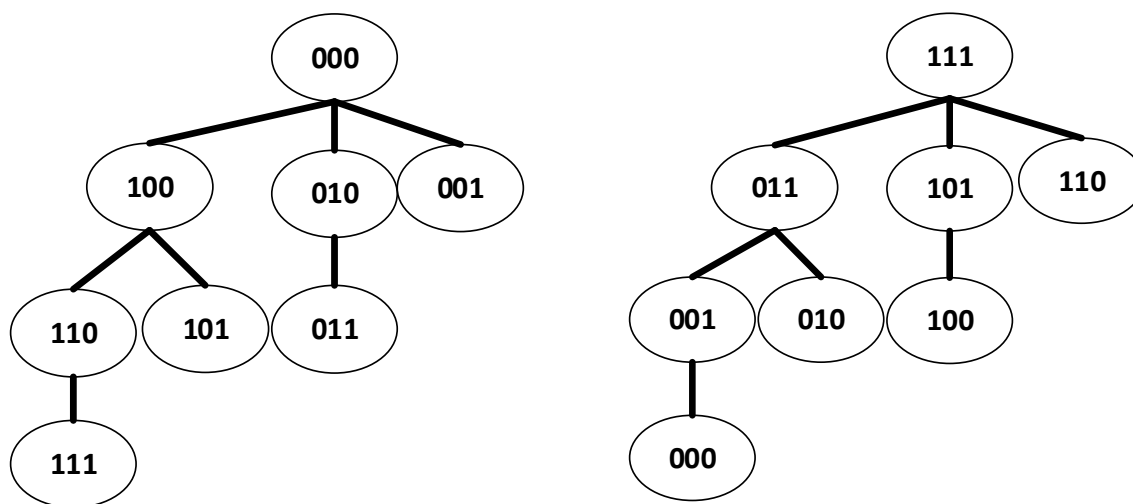


Fig. 9. Routing trees for classic hypercube topology

Of course, in case of failure of two and more nodes the malfunction bypassing can be difficult or even impossible to do, using the routing trees. In the case of fault-tolerant topologies, there are three elements with the same digits in code, not only two. As result, the 3 routing trees can be designed, and failure of 2 elements will not lead to system failure. Moreover, if elements with the same number have been substituted by clusters or multiprocessor systems, then it is possible usually to bypass the malfunction, by delivering information not through “original” node. In this situation, it is possible to use a node with the same number but with a different code.

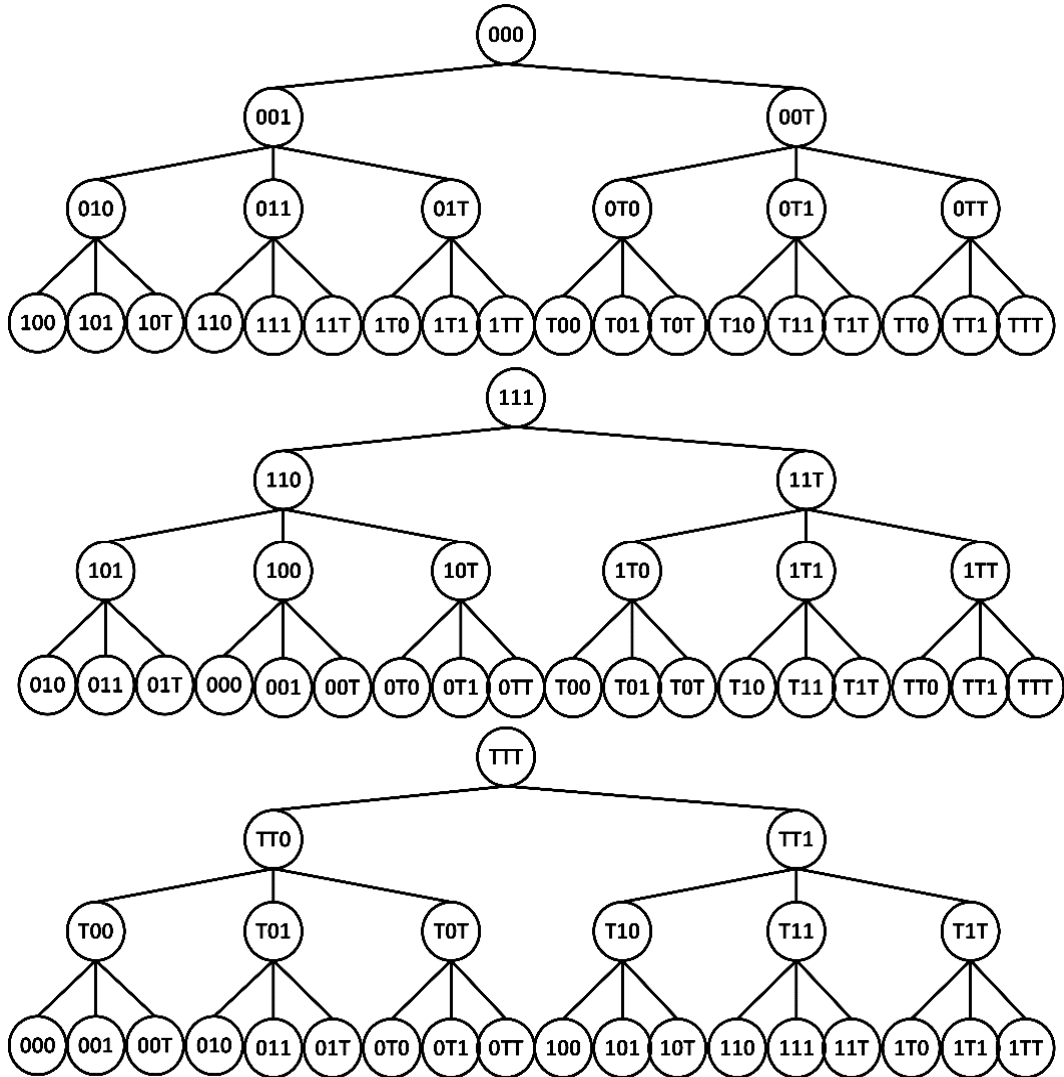


Fig. 10. Routing trees for de Bruin topology, based on 3-digits excess code

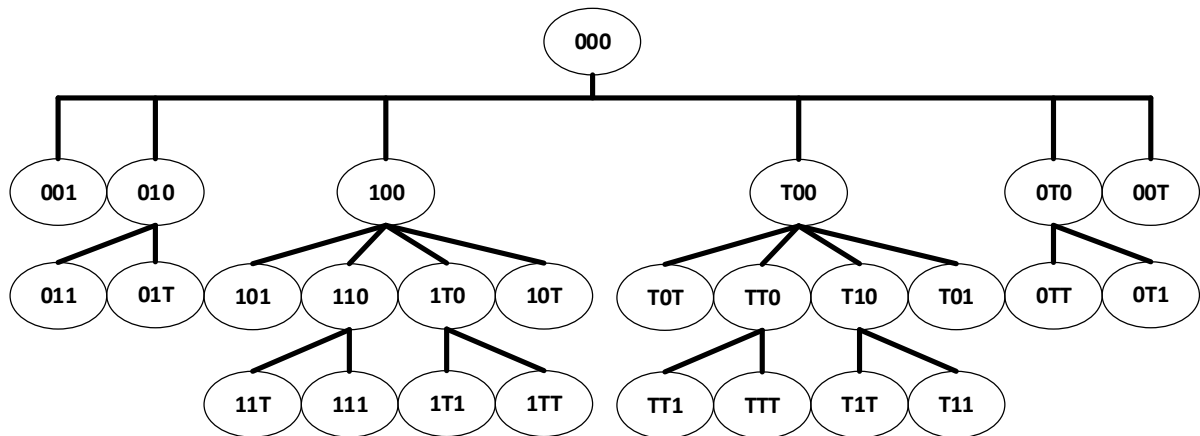


Fig. 11. Routing tree for hypercube, based on 3-digits excess code, built from node 000

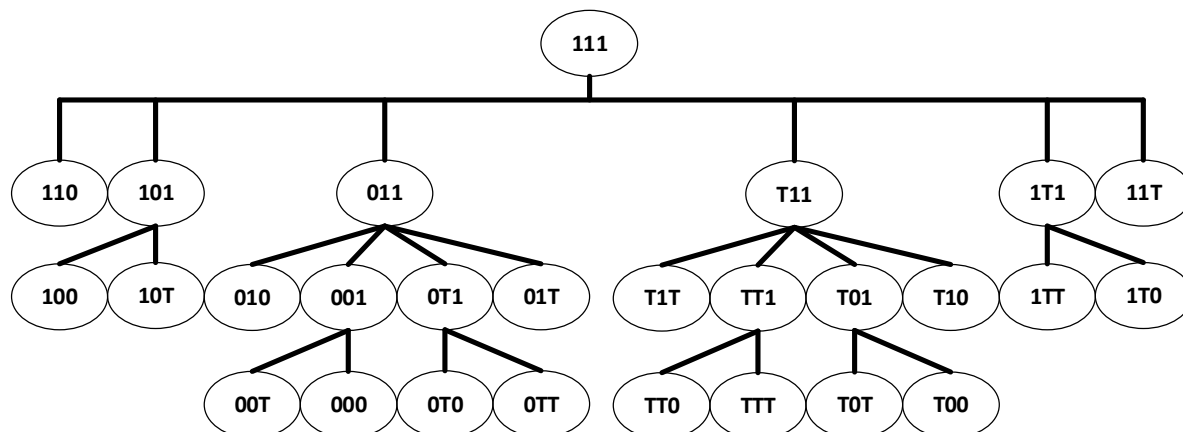


Fig. 12. Routing tree for hypercube, based on 3-digits excess code, built from node 111

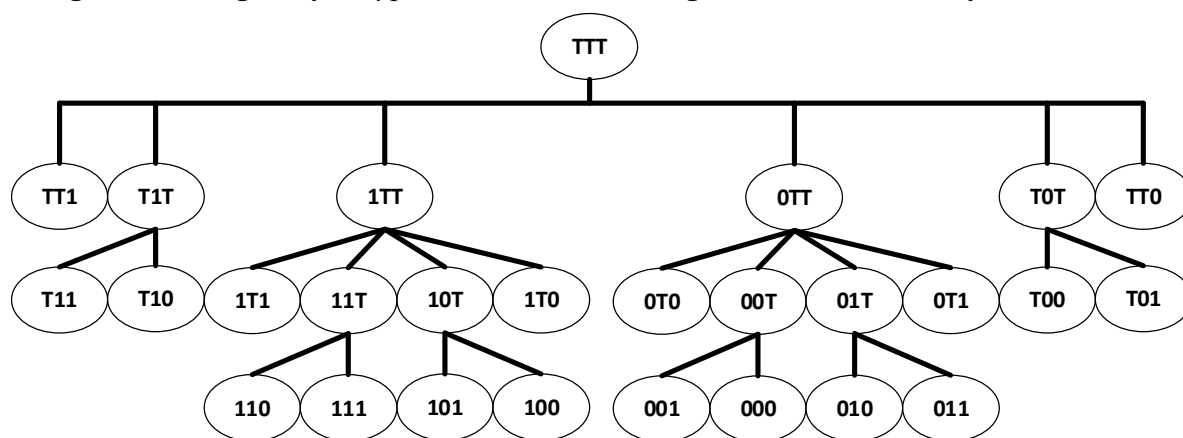


Fig. 13. Routing tree for hypercube, based on 3-digits excess code, built from node TTT

Comparison of designed topologies characteristics. The comparison of designed topologies was done. In table 7 describes basic parameters of topological structures such as power, diameter and others are given.

Table 7

Topologies comparison by the main characteristics

Parameter	Base topologies						Redundant topologies					
	De Bruin			Hypercube			De Bruin			Hypercube		
Topology	3	5	8	3	5	8	2	3	5	2	3	5
Count of bits (N)	3	5	8	3	5	8	2	3	5	2	3	5
Count of nodes	8	32	256	8	32	256	9	27	243	9	27	243
Diameter	3	5	8	3	5	8	2	3	5	2	3	5
Power	4	4	4	3	5	8	6	6	6	4	6	10
Count of edges	16	64	512	12	80	1024	27	81	723	18	81	1215
Minimum number of nodes that must fail for the impossibility of using routing trees	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3

Conclusions. In this paper method for fault-tolerant topology synthesis was proposed. It is based on using the excess code. Tree-based routing method considered, that allows to bypass the faulted nodes.

The advantages of proposed topologies are: a higher level of fault tolerance, which is achieved with the using of an additional tree, and the possibility of substitution nodes with same numbers in clusters, that additionally increases the fault tolerance of system and allows at the same time to abstract from the structure of clusters and access to concrete elements. It prevents the inaction of elements and associated loss of performance.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

However, proposed solutions has disadvantages too. Firstly, it is the power increasing. As can be seen from the table, power of de Bruin topology is always equal to 4, while power for hypercube is equal to the number of bits in the code of nodes. Excess code usage increases the power of both topologies. For the de Bruin topology, power become equal to 6 and it isn't depending of the number of nodes. In case of usage excess encoding for hypercube, the power increases as $2N$, where N is the number of digits of the encoding. It means that if $N = 4$ the power of hypercube will be equal to 8, while the optimal for realization is the value of this parameter from 4 to 6. As a result, the complexity of this topology increases with large N .

There are several possible options to improve the solutions developed. First, if necessary, it is possible to reduce the number of elements, by assigning to the same element different codes with the same value. Second, it is possible to remove some connections that are not used in trees, thereby reducing the cost on designing the system. Thirdly, it is possible to duplicate the key elements of trees, thereby increasing the fail-tolerance of the entire system.

References

1. InfiniBand Trade Association. *InfiniBand Architecture Specification*, 1, 1.2.1. Retrieved from <http://www.infinibandta.com>.
2. Eric Games, Humberto Ortiz-Zuazaga (2016). Low Level Performance Evaluation of InfiniBand with Benchmarking Tools. *International Journal of Computer Network and Information Security (IJCNIS)*, 8(10), 12-22.
3. Mukhin, V., Volokyta, A., Heriatovych, Y., Rehida, P. (2018). Method for efficiency increasing of distributed classification of the images based on the proactive parallel computing approach. *Advances in Electrical and Computer Engineering*, 18(2), 117-122.
4. Hu, Z., Mukhin, V., Kornaga, Y., Volokyta, A., & Herasymenko, O. (2017). The scheduler for distributed computer systems based on the network centric approach to resources control. In: *Proceedings of the 2017 IEEE 9th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, IDAACS 2017* (pp. 518-523).
5. Linder D., Harden J. (1991). An adaptive and fault tolerant wormhole routing strategy for k-ary n-cubes. *IEEE Transactions on computers*, 1, 2-12.
6. Lionel M. Ni, Philip K. (1993). A Survey of Wormhole Routing Techniques in Direct Networks. *Computer*, 2, 62-76.
7. Richard J. Cole, Bruce M. Maggs, Ramesh K. Sitaraman. (2001). On the Benefit of Supporting Virtual Channels in Wormhole Routers. *Journal of Computer and System Sciences*, 62(1), 152-177.
8. Washington N., Perros H. (2007). Performance Analysis of Traffic-Groomed Optical Networks Employing Alternate Routing Techniques. *Lecture Notes in Computer Science*, 4516, 1048-1059.

УДК 004.052.3:004.22

Георгій Луцький, Артем Волокита, Павло Регіда, Олександр Гончаренко

ВИКОРИСТАННЯ НАДЛИШКОВОГО КОДУ ДЛЯ ПОБУДОВИ ВІДМОВОСТІЙКИХ ТОПОЛОГІЙ

Актуальність теми дослідження. Завдання підвищення відмовостійкості є одним із головних завдань при побудові обчислювальної системи і при модернізації вже існуючої. Особливу увагу їй приділяють при побудові мультикомп'ютерних систем чи кластерів. Найбільш цікавими способами збільшення відмовостійкості є використання топологічної структури системи для обходу несправності та використання того чи іншого елемента системи для заміщення несправного. Звісно, це потребує розробки специфічної топології. У статті розглянуто розробку відмовостійких версій популярних топологій, таких як квазіквантова та гіперкуб, на основі надлишкового коду 0/1/-1.

Постановка проблеми. Важливою частиною будь-якої мультикомп'ютерної системи є її топологічна структура. Від неї залежить маршрутизація повідомлень у системі, швидкість передачі повідомлень і відмовостійкість. У статті запропоновано метод для підвищення відмовостійкості, що ґрунтується на використанні надлишкового коду.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Нині добре описано синтез таких топологій, як гіперкуб чи топологія де Бруїна, є роботи, що розглядають методи збільшення відмовостійкості за допомогою дублювання обчислювальних елементів. Також наявні роботи, що розглядають використання маршрутизації на основі дерев для покращення відмовостійкості системи.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Не розглянутими на сьогодні залишаються можливості застосування надлишкового кодування 0/1/-1 для створення нових відмовостійких топологій на основі вже існуючих.

Постановка завдання. Завданням є опис синтезу відмовостійких топологій, розгляд можливостей використання їхніх особливостей та аналіз основних характеристик у порівнянні між собою та з класичними версіями на основі двійкового коду.

Виклад основного матеріалу. Описано синтез гіперкуба та топології де Бруїна на основі звичайного двійкового коду та надлишкового коду 0/1/-1, розглянуто можливості використання надлишковості, передусім для підвищення відмовостійкості, проведено порівняльний аналіз усіх згаданих топологій.

Висновки відповідно до статті. Виконано аналіз характеристик, виділено основні переваги та недоліки запропонованих топологічних структур, висунуто пропозиції щодо їх покращення.

Ключові слова: відмовостійкість; де Бруїн; гіперкуб; надлишковий код.

Рис.: 13. **Табл.:** 7. **Бібл.:** 9.

Loutskii Heorhii – Professor, Department of Computer Engineering, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (37 Pobedy Av., 03056 Kyiv, Ukraine).

Луцький Георгій Михайлович – професор, кафедра обчислювальної техніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна).

E-mail: georgijluckyj80@gmail.com

Volokyta Artem – associate professor, Department of Computer Engineering, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (37 Pobedy Av., 03056 Kyiv, Ukraine).

Волокита Артем Миколайович – доцент, кафедра обчислювальної техніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна).

E-mail: artem.volokita@kpi.ua

Rehida Pavlo – assistant, Department of Computer Engineering, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (37 Pobedy Av., 03056 Kyiv, Ukraine).

Регіда Павло Геннадійович – асистент, кафедра обчислювальної техніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна).

E-mail: pavel.regida@gmail.com

Goncharenko Olexandr – student, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (37 Pobedy Av., 03056 Kyiv, Ukraine).

Гончаренко Олександр Олексійович – студент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна).

E-mail: alexandr.ik97@ukr.net

Ярослав Усов

ПРОБЛЕМИ ЗАХИЩЕНОСТІ ІНФОРМАЦІЙНОГО СЕРЕДОВИЩА

Актуальність теми дослідження. У статті висвітлено проблеми захищеності інформаційного середовища, запропоновано аналіз низки звітів провідних організацій у сфері захисту інформації щодо загроз кібербезпеці за останній рік, сформульовано означення захищеного інформаційного середовища (ІС) та виділено його складові.

Постановка проблеми. Забезпечення захисту інтересів особи, суспільства та держави від зовнішніх і внутрішніх загроз, які стосуються питань кібербезпеки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Значний внесок у розвиток систем захисту інформації та забезпечення кібербезпеки загалом зробили провідні вітчизняні та закордонні науковці.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Значний обсяг накопичених у цій галузі знань, недостатньо дослідженою залишилися проблеми захищеності інформаційного середовища.

Постановка завдання. Стратегія кібербезпеки України має за мету створення умов для безпечного функціонування кіберпростору, його використання в інтересах особи, суспільства й держави.

Виклад основного матеріалу. Кіберпростір є інформаційним середовищем, яке функціонує за допомогою інформаційно-телекомунікаційних систем, тобто сукупності інформаційних та телекомунікаційних систем, які в процесі обробки інформації діють як єдине ціле.

Висновки відповідно до статті. Враховуючи існуючу останню аналітику щодо ризиків та загроз кібербезпеці, можна зробити висновок, що для забезпечення захисту інформації: за напрямками (технічний, інженерний, криптографічний та організаційний) та забезпечення захисту властивостей інформації (цілісність, конфіденційність, доступність), інструментальними оболонками ІС мають стати: апаратні, програмні, правові та апаратно-програмні засоби захисту інформації.

Ключові слова: захищене інформаційне середовище; кібербезпека; захист інформації.

Бібл.: 14.

Актуальність теми дослідження. У статті висвітлено проблеми захищеності інформаційного середовища, запропоновано аналіз низки звітів провідних організацій у сфері захисту інформації щодо загроз кібербезпеці за останній рік, сформульовано визначення захищеного інформаційного середовища (ІС) та виділено його складові, а саме інструментальними оболонками ІС мають стати: апаратні, програмні, правові та апаратно-програмні засоби захисту інформації, при цьому захист інформації буде здійснюватись за технічним, інженерним, криптографічним та організаційним напрямками.

Постановка проблеми. Розвиток глобального інформаційного суспільства, швидкий темп розвитку сучасних ІТ-технологій у всіх сферах діяльності (як у державному, так і в приватному секторі), а також їх стрімке поширення серед широких мас населення обумовлюють необхідність забезпечення кібернетичного захисту інформації. Тобто забезпечення захисту інтересів особи, суспільства та держави від зовнішніх і внутрішніх загроз, які стосуються питань кібербезпеки.

Таким чином, питання захищеності інформаційного середовища виступають на перший план.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Значний внесок у розвиток систем захисту інформації та забезпечення кібербезпеки загалом зробили такі провідні вітчизняні та закордонні науковці, як О. Є. Архіпов, В. Л. Бурячок, Ю. О. Дрейс, С. В. Казмірчук, В. В. Козловський, О. Г. Корченко, В. А. Лахно, В. О. Хорошко, К. Шеннон, В. Гібсон, Брюс Шнайер, Чарльз Г. Беннет, G. Bertoni, С. Chapman, В. Chor, J. Daemen, J. Dawkins, M. Endler, M. Hellman, G. Kaiser, A. Keromytis, V. Misra, J. Nieh, R. Rivest, A. Shamir, F. Silva, S. Stolfo та ін.

Разом з тим проблема забезпечення кібербезпеки залишається актуальною як для України, так і для всього світу.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проте, незважаючи на значний обсяг накопичених у цій галузі знань, недостатньо дослідженою залишилися проблеми захищеності інформаційного середовища. Захисту інформаційного середовища, яке оточує сучасне суспільство в усіх сферах життєдіяльності людини, не приділено належної уваги.

Мета статті. Висвітлити проблеми захищеності інформаційного середовища.

Виклад основного матеріалу. Сьогодні наука та законодавча база щодо проблеми кібербезпеки перебувають на етапі свого активного розвитку, коли відбувається формування понятійно-категоріального апарату теорії права й держави як на законодавчому рівні, де приймаються закони, постанови, стратегії тощо, так і на рівні наукового середовища.

Так, протягом останніх кількох років було прийнято багато нормативних актів.

Наприклад, правові та організаційні основи забезпечення захисту життєво важливих інтересів людини і громадянина, суспільства та держави, національних інтересів України в кіберпросторі, основні цілі, напрями та принципи державної політики у сфері кібербезпеки, повноваження державних органів, підприємств, установ, організацій, осіб та громадян у цій сфері, основні засади координації їхньої діяльності із забезпечення кібербезпеки висвітлені в Законі України «Про основні засади забезпечення кібербезпеки України» (№ 2469-VIII від 21.06.2018). Значна увага в Законі приділена означенню таких понять, як «кібератака», «кібербезпека», «кіберзагроза», «кіберзахист», «кіберзлочин» (комп'ютерний злочин), «кібероборона», «кіберпростір», «кіберрозвідка», «кібертероризм», «кібершпигунство» та ін. Закон визначає Національну систему кібербезпеки, яка «є сукупністю суб'єктів забезпечення кібербезпеки та взаємопов'язаних заходів політичного, науково-технічного, інформаційного, освітнього характеру, організаційних, правових, оперативно-розшукових, розвідувальних, контррозвідувальних, оборонних, інженерно-технічних заходів, а також заходів криптографічного і технічного захисту національних інформаційних ресурсів, кіберзахисту об'єктів критичної інформаційної інфраструктури» [4].

Законом України «Про основи національної безпеки України» (№ 2469-VIII від 21.06.2018) визначає основні засади державної політики, спрямованої на захист національних інтересів і гарантування в Україні безпеки особи, суспільства і держави від зовнішніх і внутрішніх загроз у всіх сферах життєдіяльності. У ньому тлумачаться терміни «національна безпека», «національні інтереси», «загрози національній безпеці» [5].

Стратегія кібербезпеки України (затверджена Указом президента України від 15 березня 2016 року № 96/2016) має за мету створення умов для безпечного функціонування кіберпростору, його використання в інтересах особи, суспільства і держави. Для досягнення цієї мети визначені завдання:

- створення національної системи кібербезпеки;
- посилення спроможностей суб'єктів сектору безпеки та оборони для забезпечення ефективної боротьби із кіберзагрозами воєнного характеру, кібершпигунством, кібертероризмом та кіберзлочинністю, поглиблення міжнародного співробітництва в цій сфері;
- *забезпечення кіберзахисту державних електронних інформаційних ресурсів, інформації, вимога щодо захисту якої встановлена законом, а також інформаційної інфраструктури, яка знаходиться під юрисдикцією України та порушення сталого функціонування якої матиме негативний вплив на стан національної безпеки й оборони України (критична інформаційна інфраструктура) [9].*

Таким чином, сьогодні питання забезпечення кібербезпеки є надзвичайно актуальним, що підтверджується тенденцією до збільшення уваги держави до цього питання через зростання кількості прийнятих щодо цієї проблеми нормативно-правових актів. Є і певні досягнення в напрямку організації заходів із протидії сучасним викликам у сфері інформаційних технологій та кіберзагрозам. Зокрема, Законом України «Про основні засади забезпечення кібербезпеки України» передбачено створення Урядової команди реагування на комп'ютерні надзвичайні події України CERT-UA.

Проте ці заходи перебувають на етапі становлення та не мають комплексного (системного) характеру. Зауважимо, що захисту інформаційного середовища, яке оточує сучасне суспільство в усіх сферах життєдіяльності людини, не приділено належної уваги.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Отже, актуальність подальшого встановлення сутності поняття «захищене інформаційне середовище» не викликає сумніву, адже розуміння цього поняття сприятиме вибудовуванню правильної стратегії щодо її захисту.

Проаналізувавши основні нормативно-правові акти щодо інформаційного середовища та його захисту ми дійшли висновку, що *на законодавчому рівні це поняття оминули.*

Зупинимось на висвітленні проблеми побудови захищеного інформаційного середовища в науковій сфері.

Спроби визначитись із дефініціями понятійних конструктів «інформаційне середовище» стали вже традиційними для значної частини дисертаційних досліджень. Але науковці так і не дійшли до одноставної думки щодо цього поняття.

Оскільки «інформаційне середовище» є змістовим ядром понятійного конструкта «захищене інформаційне середовище», то розглянемо спочатку його.

Аналіз сучасної науково-практичної літератури засвідчив, що понятійний конструкт «інформаційне середовище» (ІС) тлумачать таким чином:

- це частина інформаційного простору, що характеризується мінімальною територією поширення та обмеженою кількістю суб'єктів інформаційної діяльності, а також обумовлюється своєрідним інформаційним мікрокліматом, що включає сукупність способів, прийомів, заходів та умов безпосереднього здійснення інформаційної діяльності; при цьому *інформаційний простір* – це частина інформаційної сфери, обмеженої матеріальною та нематеріальною територією поширення, центром якої є сукупність суб'єктів, що здійснюють інформаційну діяльність, а її складовими – інформація та інформаційні відносини, інформаційна наука та інформаційна культура, інформаційна діяльність та інформаційна інфраструктура, інформаційне право та інформаційне законодавство [8];

- це сукупність технічних і програмних засобів зберігання, обробки і передачі інформації, а також політичні, економічні й культурні умови реалізації процесів інформатизації [6];

- це сфера діяльності суб'єктів, пов'язана зі створенням, перетворенням, споживанням інформації [1];

- це середовище, що постійно і дедалі більш агресивно збільшує мотивацію підрастаючого покоління до споживання контенту, що циркулює в ньому; надає доступ до ресурсів у будь-який зручний час; володіє зручним, гнучким, дружнім, інтелектуальним сервісом, що допомагає людині знайти необхідні інформаційні ресурси, дані або знання; не є емоційним, воно працює відповідно запитам людини стільки, скільки їй необхідно; наповнює інформацією, даними, знаннями з величезною, постійно наростаючою швидкістю; дозволяє організувати практично безкоштовні, зручні у часі контакти між будь-якою кількістю людей, забезпечити зручні у часі контакти між будь-якою кількістю людей, забезпечити зручний і гнучкий обмін інформацією (причому в будь-якому вигляді) між ними; крок за кроком, стандартизує, а потім інтегрує в собі функціональність усіх попередніх, нині, так званих, традиційних засобів отримання, збереження, обробки і представлення необхідної люду інформації, даних та знань; бере на себе все більш рутинних операцій, пов'язаних з операційною діяльністю людини (це, до речі, одна з найбільших проблем, яку людство очікує в майбутньому – «чим більше доручень – тим більше відповідальності – тим більше небезпеки залишитися без ресурсів»); одержує дедалі більше контролю над даними та операційною діяльністю людства [7].

Таким чином, *інформаційне середовище обмежується територією та в часі. Воно характеризується певним мікрокліматом та організаційними умовами. Це може бути як окремий колектив, так і підприємство, держава і т. ін. Інформаційне середовище може включати безліч інформаційних об'єктів і зв'язків між ними, містити цілу низку засобів і технологій для обробки, накопичення, передавання та продукування інформації.*

Оскільки згідно із Законом України «Про основні засади забезпечення кібербезпеки України» кібербезпека – це захищеність життєво важливих інтересів людини і громадянина, суспільства та держави під час використання кіберпростору, за якої забезпечуються сталий розвиток інформаційного суспільства та цифрового комунікативного середовища, своєчасне виявлення, запобігання і нейтралізація реальних і потенційних загроз національній безпеці України у кіберпросторі [4], то в цьому контексті *інформаційне середовище* – це не лише суб'єкти і об'єкти (засоби, прийоми та методи захисту, тобто «*інструментальні оболонки середовища*»), а і їх змістове наповнення – сама «інформація». При цьому сам кіберпростір і є інформаційним середовищем, яке функціонує за допомогою інформаційно-телекомунікаційних систем, тобто сукупності інформаційних та телекомунікаційних систем, які в процесі обробки інформації діють як єдине ціле [3].

Згідно з ДСТУ 3396.2-97 [2] інформацію як таку захищати неможливо, тому що вона не існує сама по собі, а фіксується (відображається) в певних матеріальних об'єктах або пам'яті людей, які виступають у ролі суб'єктів (носіїв) і являють собою базовий об'єкт захисту, а оскільки інформаційне середовище являє собою сукупність технічних і програмних засобів зберігання, обробки і передачі інформації, то його (інформаційне середовище) можна захистити.

Отже, *захищене інформаційне середовище* (ЗІС) – це сукупність технічних і програмних засобів зберігання, обробки і передачі інформації, до якої застосовні взаємопов'язані організаційні, інженерно-технічні та *криптографічні* заходи, засоби та методи захисту, що забезпечують цілісність, конфіденційність і доступність інформації за умов впливу на неї загроз природного або штучного характеру.

Загроза (threat) – це можлива причина небажаного інциденту, який може завдати шкоди системі або організації [12].

Ми поділили загрози ІС на загрози природного та штучного характеру. Під *природними* (об'єктивними) ми розуміємо загрози викликані дією будь-яких стихійних явищ або фізичних процесів, які не залежать від людини; під *штучними* (суб'єктивними) – що виникають унаслідок впливу людини. Також штучні загрози можуть бути як навмисними (умисні дії людини), так і ненавмисними (збої, відмови тощо).

Загалом перш ніж загроза кібербезпеки стає реальною, є ризик реалізації тієї чи іншої вразливості.

Ризик інформаційної безпеки пов'язаний із ймовірністю того, що загрози будуть реалізовуватись через використання вразливостей інформаційних активів або груп інформаційних активів і, тим самим, завдає збитків організації [12].

Сьогодні США створено Національну базу даних вразливостей (National Vulnerability Database, скорочення NVD), яка містить інформаційну базу даних національного органу стандартизації США, Національного інституту стандартів і технології. У своїй базі вони перелічують відомі вразливості та баги програмного забезпечення. Призначення бази – допомога в уникненні несанкціонованого доступу (НСД) до інформації.

У звіті, наведеному лабораторією кібератак *Varonis Global Data Risk* [14], зазначено, що:

- 21 % всіх папок відкрито для всіх;
- 58 % мають більше 100 000 відкритих папок для кожного;
- 54 % даних є застарілими;
- 41 % компаній мають понад 1000 конфіденційних файлів відкриті для всіх.

Дані, наведені у звіті *CSO from IDG* [11], говорить про те, що 11 найкращих статистичних даних із кібербезпеки – це:

- 90 % атак віддаленого виконання коду пов'язані з криптомініванням;
- 92 % шкідливих програм доставляються електронною поштою;

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

– 56 % тих, хто приймає рішення щодо ІТ, вважають, що цільові атаки фішингу є їхньою загрозою безпеки;

- 77 % компрометованих атак у 2017 році були безладними;
- середня атака на вимогах компанії коштує компанії 5 мільйонів доларів;
- організація потребує в середньому 191 день для виявлення порушень даних;
- 69 % компаній бачать, що мандати на виконання вимог регулюють витрати;
- 88 % компаній витратили понад 1 мільйон доларів на підготовку до ВВП;
- 25 % організацій мають окремих відділ безпеки;
- 54 % компаній пережили інцидент безпеки системи промислового контролю;
- 61% організацій пережили інцидент безпеки IoT.

PREY Nation охарактеризував такі факти кібербезпеки [13]:

1. 70 % організацій кажуть, що вони вважають, що їх ризик безпеки значно збільшився в 2017 році (Ponemon Institute).
2. До 2020 року кількість паролів, що використовуються людьми та машинами в усьому світі, зросте до 300 мільярдів (SC Media).
3. 43 % кібератак націлені на малий бізнес (Тенденції малого бізнесу).
4. Щодня виробляється 230 000 нових зразків шкідливого програмного забезпечення - і це передбачає лише зростання (Panda Security).
5. 90% хакерів покривають свої треки за допомогою шифрування (Вансон Борн).
6. Більшість компаній займають більше шести місяців, або близько 197 днів для виявлення порушення даних (ZD Net).
7. Windows є найбільш цільовою платформою для хакерів; Android – це номер два (Комп'ютерний світ).
8. Були більш 3 мільйони відповідей крипто домкрата в період із січня по травень 2018 роки (Quick Heal).
9. Кількість варіантів зловмисного програмного забезпечення для мобільних криптозахисних пристроїв зросла з 8 варіантів у 2017 році до 25 варіантів до травня 2018 року – збільшившись утричі.

Ландшафт атак згідно зі звітом Cisco 2018 [10] такий:

- розвиток шкідливих програм;
- зашифрований зловмисний веб-трафік;
- загрози з боку електронної пошти;
- тактика ухилення від «пісочниці»;
- злочинне використання хмарних сервісів та інших легітимних ресурсів;
- Інтернет речей та DDoS-атаки;
- уразливості та використання патчів.

Висновки відповідно до статті. Таким чином, ми бачимо, що у зв'язку зі стрімким розвитком ІТ технологій, нові загрози виникають мало не щодня, про що свідчить наведена вище статистика. Отже, враховуючи існуючу останню аналітику щодо ризиків та загроз кібербезпеці, можна зробити висновок, що для забезпечення захисту інформації: за напрямками (технічний, інженерний, криптографічний та організаційний) та забезпечення захисту властивостей інформації (цілісність, конфіденційність, доступність), *інструментальними оболонками ІС мають стати:* апаратні, програмні, правові та апаратно-програмні засоби захисту інформації.

Список використаних джерел

1. Арский Ю. М., Гиляревский Р. С., Туров И. С., Черный А. И. Инфосфера: Информационные структуры, системы и процессы в науке и обществе. Москва: ВИНТИ, 1996. 489 с.
2. ДСТУ 3396.2-97. Захист інформації. Технічний захист інформації. Терміни та визначення. [Чинний від 01.01.1998 р.]. URL: http://www.dsszzi.gov.ua/dsszzi/control/uk/publish/article?art_id=38934&cat_id=38836.

3. Про захист інформації в інформаційно-телекомунікаційних системах: Закон України від 05.07.1994 № 80/94-ВР. URL: <https://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/80/94-%D0%B2%D1%80>.
4. Про основні засади забезпечення кібербезпеки України: Закон України від 21.06.2018 № 2469-VIII. URL: <https://uteka.ua/ua/publication/news-14-novosti-zakonodatelstva-1-osnovnye-principy-obespecheniya-kiberbezopasnosti-ukrainy-prinyat-zakon>.
5. Про основи національної безпеки України: Закон України від 21.06.2018_№ 2469-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2469-19>.
6. Інформаційне середовище. 2018. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%86%D0%BD%D1%84%D0%BE%D1%80%D0%BC%D0%B0%D1%86%D1%96%D0%B9%D0%BD%D0%B5_%D1%81%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D1%89%D0%B5.
7. Петухова Л. Є., Співаковський О. В. До питання про трисуб'єктну дидактику. *Комп'ютер у школі та сім'ї*. 2007. № 5 (61). С. 7–9.
8. Селезньова О. М. Теоретико-методологічне трактування окремих засадничих категорій інформаційного права. 2019. URL: <http://aphd.ua/publication-164>.
9. Стратегія кібербезпеки України: затверджена Указом Президента України від 15 березня 2016 року № 96/2016. URL: <https://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/96/2016>.
10. Cisco 2018. URL: https://www.cisco.com/c/uk_ua/products/security/security-reports.html.
11. CSO from IDG. 2018. URL: <https://www.csoonline.com/article/3153707/security/top-cybersecurity-facts-figures-and-statistics.html>.
12. ISO/IEC 27000. Серія стандартів. 2018. URL: <https://intercert.com.ua/articles/regulatory-documents/210-iso-27000>.
13. PREY Nation. 2018. URL: <https://preyproject.com/blog/en/24-cybersecurity-statistics-that-matter-in-2019>.
14. Varonis Global Data Risk. 2018. URL: <https://info.varonis.com/hubfs/2018%20Varonis%20Global%20Data%20Risk%20Report.pdf>.

References

1. Arskiy, Yu. M., Giliarevskiy, R. S., Turov I. S., Chorniy, A. I. (1996). *Infosfera: Informatsionnye struktury, sistemy i protsessy v nauke i obshchestve [Infosphere: Information Structures, Systems and Processes in Science and Society]*. Moscow: VINITI [in Ukrainian].
2. DSTU 3396.2-97. Zakhyst informatsii. Tekhnichniy zakhyst informatsii. Terminy ta vyznachennia [Information protection. Technical protection of information. Terms and definitions]. Effective as of 01.01.1998. Retrieved from http://www.dsszzi.gov.ua/dsszzi/control/uk/publish/article?art_id=38934&cat_id=38836.
3. Pro zakhyst informatsii v informatsiino-telekomunikatsiinykh systemakh [On Information Protection in Information and Telecommunication Systems]. № 80/94-ВР (on April 19, 2014). Retrieved from <https://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/80/94-%D0%B2%D1%80>.
4. Pro osnovni zasady zabezpechennia kiberbezpeky Ukrainy [On the Basic Principles of Cybersecurity of Ukraine]. № 2469-VIII (on June 21, 2018). Retrieved from <https://uteka.ua/ua/publication/news-14-novosti-zakonodatelstva-1-osnovnye-principy-obespecheniya-kiberbezopasnosti-ukrainy-prinyat-zakon>.
5. Pro osnovy natsionalnoi bezpeky Ukrainy [On National Security of Ukraine]. № 2469-VIII (on 21.06.2018). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2469-19>.
6. Informatsiine seredovyshche [Information environment] (2018). Retrieved from https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%86%D0%BD%D1%84%D0%BE%D1%80%D0%BC%D0%B0%D1%86%D1%96%D0%B9%D0%BD%D0%B5_%D1%81%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D1%89%D0%B5.
7. Petukhova, L. Ye., Spivakovskiy, O. V. (2007). Do pytannia pro trysub'iektnu dydaktyku [On the issue of three-subject didactics]. *Kompiuter u shkoli ta simi – Computer at school and family*, 5 (61). 7-9 [in Ukrainian].
8. Seleznev O. M. (2019). Teoretyko-metodolohichne traktuvannia okremykh zasadnychkykh katehorii informatsiinoho prava [Theoretical and methodological treatment of certain basic categories of information law]. Retrieved from <http://aphd.ua/publication-164>.
9. Stratehiia kiberbezpeky Ukrainy [Strategy of cyber security of Ukraine]. № 96/2016 (on March 15, 2016). Retrieved from <https://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/96/2016>.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

10. Cisco 2018 (2018). Retrieved from https://www.cisco.com/c/en_products/security/security-reports.html.
11. CSO from IDG (2018). Retrieved from <https://www.csoonline.com/article/3153707/security/top-cybersecurity-facts-figures-and-statistics.html>.
12. ISO / IEC 27000. Standard series (2018). Retrieved from <https://intercert.com.ua/articles/regulatory-documents/210-iso-27000>.
13. PREY Nation (2018). Retrieved from <https://preyproject.com/blog/en/24-cybersecurity-statistics-that-matter-in-2019/>.
14. Herat Global Data Risk (2018). Retrieved from <https://info.varonis.com/hubfs/2018%20Varonis%20Global%20Data%20Risk%20Report.pdf>.

UDC 004.056.5

Yaroslav Usov

PROBLEMS OF THE INFORMATIONAL ENVIRONMENT PROTECTION

Urgency of the research. In the article the problem of security information environment presents an analysis of a number of reports leading organizations in the field of information security threats of cybersecurity last year, formulated the definition of secure information environment (IE) and highlighted its components.

Target setting. Ensuring the protection of the interests of the individual, society and the state from external and internal threats related to cybersecurity.

Actual scientific researches and issues analysis. The leading Ukrainian and foreign scientists made a significant contribution to the development of information security and cybersecurity systems in general.

Uninvestigated parts of general matters defining. Significant amount of accumulated knowledge in this area, insufficiently researched remained problems of the security of the information environment.

The research objective. Ukraine cybersecurity strategy aims to create conditions for the safe functioning of cyberspace, its use for the benefit of individuals, society and the state.

The statement of basic materials. Cyberspace is an information environment that operates using information and telecommunication systems that aggregate information and telecommunication systems in the information processing function as a unit.

Conclusions. Considering the latest analytics about the risks and threats cybersecurity, we can conclude that for the protection of information, in areas (technical, engineering, cryptography and organizational) and protection properties of information (integrity, confidentiality, availability) tool shells IC should be: hardware, software, legal and hardware-software information security.

Keywords: protected information environment; cybersecurity; information protection.

References: 14.

Усов Ярослав Юрійович – викладач, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Usov Yaroslav – Senior Lecturer, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: usov75@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7771-0524>

ResearcherID: G-2406-2019

Scopus Author ID: 57205630823

УДК 311+512

DOI: 10.25140/2411-5363-2019-1(15)-152-161

Олександр Дубягін, Володимир Гур'єв

**СИСТЕМА ПОКАЗНИКІВ МІЖРІВНЕВОГО БАЛАНСУ:
АГРЕГАТНА ФОРМА**

Актуальність теми дослідження. Система показників міжрівневого балансу, визначених в агрегатній формі, забезпечує всебічну кількісну оцінку структурних зрушень керованого об'єкта спостереження, у тому числі оцінку його втрат (поповнення) щодо ознаки, вимірюваної в його одиниць у шкалі відношень.

Постановка проблеми. Така оцінка унеможлиблюється на основі показників міжрівневого балансу, сформульованих до цього та визначених лише через незважені (неагреговані) складові балансу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Неагреговані показники балансу, запропоновані раніше, обчислювалися через значення чисельності рухомих і нерухомих одиниць об'єкта.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Оцінка наслідків керуючого впливу на структурований об'єкт, виконувана в значеннях вимірюваної ознаки і пояснювана міжрівневим пересуванням одиниць цього об'єкта.

Постановка завдання. Створити систему показників міжрівневого балансу відповідно до їх класифікації, запропонованої раніше, шляхом формулювання правил їх обчислення в агрегатній формі.

Виклад основного матеріалу. Систематизація складових міжрівневого балансу, виконана в агрегатній формі відповідно до категорій міжрівневого руху, уможливує обчислення показників балансу, тільки вже в рівневих значеннях вимірюваної ознаки, для яких рівнева чисельність рухомих і нерухомих одиниць об'єкта відіграє роль ваги. Відповідно до класифікації показників міжрівневого балансу визначаються всі можливі їх конструкції в категоріях «призначення», «ознаки руху», «спосіб обчислення», «ступінь агрегування» та «межі руху». Порядок обчислення також залежить від того, як вимірюється ознака, чи на опорному рівні, чи поза ним.

Висновки відповідно до статті. Запропоновані показники міжрівневого балансу всебічно оцінюють наслідки керуючого впливу на структурований об'єкт і ефективність цього впливу.

Ключові слова: агрегатна форма; категорії руху; критерії класифікації; міжрівневий баланс; система показників. Табл.: 3. Рис.: 1. Бібл.: 10.

Актуальність теми дослідження. Створення системи показників міжрівневого балансу, якими забезпечується всебічна кількісна оцінка структурних зрушень керованого об'єкта спостереження, у тому числі оцінка його втрат (поповнення) щодо ознаки, вимірюваної в його одиниць у шкалі відношень, є актуальним науковим завданням оцінки наслідків керуючого впливу на структурований об'єкт й ефективності цього впливу. Подібні показники можуть бути корисними для розв'язання широкого кола задач надійності й ефективності використання систем, в яких об'єктом керування є структуроване середовище або інформаційного, або технічного походження.

Постановка проблеми. Така оцінка унеможлиблюється на основі показників міжрівневого балансу, сформульованих до цього та визначених лише через незважені (неагреговані) складові балансу. Наявні методики оцінки не враховують фактор пересування одиниць об'єкта з одного рівня ознаки на інший, через що структурний аналіз результатів впливу є неповним. Подолати цю проблему вдається завдяки авторській моделі міжрівневого балансу, синтезованої в агрегатній формі [1]. Оскільки складові балансу можуть визначатися не тільки через значення рівневої чисельності рухомих і нерухомих одиниць керованого структурованого об'єкта, а ще й через значення вимірюваної в них ознаки, то представлені ними показники балансу можуть визначатися як в неагрегованому вигляді, так і в агрегатній формі відповідно. Остання є доречною з погляду на спосіб обчислення показників, які пропонуються для вирішення цієї проблеми.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Створення системи показників, що розглядається, стало можливим завдяки балансовій моделі, синтезованої в агрегатній формі та запровадженій для характеристики структури об'єкта та руху його одиниць, а сформована раніше класифікація показників є основою для їх обчислення в агрегатній формі через відповідні складові міжрівневого балансу [1]. Аналогом останнього є модель міжгалузевого балансу В. В. Леонт'єва [2, с. 8-18]. Щодо класифікації показників за критеріями «спосіб обчислення» та «призначення», традиційно застосовані існуючі категорії статистичних показників [3-10]. Неагреговані показники балансу, запропоно-

вані автором раніше, обчислювалися лише через значення чисельності рухомих і нерухомих одиниць об'єкта.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Це – оцінка наслідків керуючого впливу на структурований об'єкт, виконувана в значеннях вимірюваної ознаки й пояснювана міжрівневим пересуванням одиниць цього об'єкта.

Постановка завдання (мета статті). Створити систему показників міжрівневого балансу відповідно до їх класифікації, запропонованої раніше, шляхом формулювання правил їх обчислення в агрегатній формі.

Виклад основного матеріалу. Нагадаємо як виглядає класифікація показників міжрівневого балансу (на рис. критерії класифікації зазначені курсивом).



Рис. Класифікація показників міжрівневого балансу

В їх обчисленні беруть участь або визначають їх безпосередньо (в другому випадку у виді абсолютних величин) агреговані складові балансу, докладно представлені в роботі [1]. Вони виражені через вихідні дані балансу про чисельність n_{ij} одиниць об'єкта ($i = 1, 2, \dots, k; j = 1, 2, \dots, k$), які зазнають міжрівневе пересування ($i \neq j$) або залишаються нерухомими на рівні ($i = j$), а також через рівневі значення l_i і l_j ознаки, вимірюваної в цих одиниць у стані «до» («0») на рівні i й у стані «після» («1») на рівні j відповідно, як суми добутків $L_{Bij} = n_{ij}l_i|_{i \neq j}$ і $L_{\Pi ij} = n_{ij}l_j|_{i \neq j}$ щодо рухомих одиниць або $L_{Hi} = n_{ij}l_i|_{j=i}$ і $L_{3j} = n_{ij}l_j|_{i=j}$ щодо нерухомих одиниць. Ці добутки являють собою агрегати, а величини $\sum_j n_{ij}l_i$, $\sum_i n_{ij}l_j$ і $\sum_j n_{ij}l_j$, $\sum_i n_{ij}l_i$ – зведені агрегати. Дві перші суми представляють спільне значення ознаки, вимірюване у відповідних одиниць об'єкта на одному й тому ж самому опорному рівні i у стані «до» (L_{i0} , L_{Bi} ($j \neq i$), L_{Biv} ($j > i$), L_{Bin} ($j < i$)) та на опорному рівні j у стані «після» (L_{j1} , $L_{\Pi j}$ ($i \neq j$), $L_{\Pi n, j}$ ($i < j$), $L_{\Pi v, j}$ ($i > j$)), інакше – в рівневих значеннях ознаки. Дві наступні суми представляють спільне значення

ознаки, вимірюване в тих же самих одиниць об'єкта на будь-якому відповідному рівні, j або i , у протилежному стані об'єкта, «після» ($L_{<i>1}$, $L_{\Pi<i>}$ ($j \neq i$), $L_{\Pi<i>H}$ ($j > i$), $L_{\Pi<i>B}$ ($j < i$)) або «до» ($L_{<j>0}$, $L_{B<j>}$ ($i \neq j$), $L_{Bv.<j>}$ ($i < j$), $L_{Bn.<j>}$ ($i > j$)), інакше – в позарівневих значеннях ознаки (поза опорного рівня ознака вимірюється в рухомих одиниць, на опорному рівні – в нерухомих одиниць). Щодо останніх, їхні значення пропонується позначати так: символіка й її розташування є тими ж самими, за винятком номера рівня, поза яким вимірюється ознака і який позначається в кутових дужках біля символу « L » рівневого значення ознаки ($<i>$, $<j>$).

Використання створених агрегатів (зведених агрегатів) уможливило обчислення показників балансу, тільки вже в рівневих значеннях вимірюваної ознаки, для яких чисельність одиниць об'єкта відіграє роль ваги. Усі різновиди агрегованих показників можна представити в тих же самих категоріях, що були сформовані раніше для аналогічних неагрегованих показників (див. рисунок).

Класифікація показників за «ознаками руху» повторює класифікацію самого руху, коли шукані показники розділяються окремими категоріями «міжрівневого пересування», «вибуття» («В») та «прибуття» («П»), в тому числі прогресивного («Вв.» і «Пн.») та регресивного («Вн.» і «Пв.»), і окремими категоріями «рівневої нерухомості», «не перехід з рівня» («Н») та «залишення на рівні» («З»). Класифікація показників за «способом обчислення» є традиційною у статистиці. Цей критерій класифікації обраний як основоположний в подальшому представництві показників в кожній окремій їх видовій категорії, сформованій за критерієм «призначення». В решті критеріїв, «ступінь агрегування» і «межі руху», групування показників балансу залежить від місця складових, що їх складають, у балансі та від способу їх обчислення: будь-яка складова балансу належить до однієї видової категорії, встановленої за кожним критерієм; складений показник визначається як парний, частковий або частинний за першим критерієм по виду його порівнюваної складової і як рівневий, груповий або загальний за другим критерієм по виду складової, з якою здійснюється порівняння.

Далі продемонструємо, як визначаються в зазначених видових категоріях показники міжрівневого балансу, які складаються лише з двох складових балансу, порівнюваних між собою через їх віднімання (абсолютні показники) або ділення (відносні та середні показники; для останніх додатково знадобляться неагреговані складові балансу). Розмістимо їх у таблицях 1-3: рівневі – у таблиці 1; групові – у таблиці 2; загальні – у таблиці 3. Групування й обчислення показників виконуються наступним чином: у стовпцях кожної таблиці вони систематизовані за критерієм «ступінь агрегування» (парні, частинні та часткові); у комірках таблиці, розташованих на перетині стовпців і рядків, розміщуються позначення показників, які визначаються відніманням (діленням) складових балансу, що представляють зменшуване (ділене) та від'ємник (дільник) відповідно зі стовпця та з рядка таблиці. Щодо більш складних конструкцій показників, таких як відносні (коефіцієнти рівневого приросту, рівневого обороту й ефективності пересування) та середні (середнє сальдо та середній оборот) балансові показники пересування – це предмет окремого розгляду.

Абсолютні агреговані показники міжрівневого балансу – це, по-перше, складові балансу, що представляють структуру об'єкта (L_{i0} , $L_{<j>0}$ і L_{j1} , $L_{<i>1}$; $L_0 = \sum_{i=1}^k L_{i0} = \sum_{j=1}^k L_{<j>0}$ і $L_1 = \sum_{j=1}^k L_{j1} = \sum_{i=1}^k L_{<i>1}$) у станах «до» і «після» та структуру руху його одиниць (L_{Bi} , $L_{B<j>}$, $L_{Biv.}$, $L_{Bv.<j>}$, $L_{Bin.}$, $L_{Bn.<j>}$, L_{Hi} , L_{Hj} і $L_{\Pi j}$, $L_{\Pi<i>}$, $L_{\Pi n.j}$, $L_{\Pi<i>n.}$, $L_{\Pi v.j}$, $L_{\Pi<i>v.}$, L_{3j} , L_{3i} ; $L_B = \sum_{i=1}^k L_{Bi} \equiv \sum_{j=1}^k L_{B<j>}$, $L_{Bv.} = \sum_{i=1}^{k-1} L_{Biv.} \equiv \sum_{j=2}^k L_{Bv.<j>}$, $L_{Bn.} = \sum_{i=2}^k L_{Bin.} \equiv \sum_{j=1}^{k-1} L_{Bn.<j>}$, $L_H = \sum_{i=1}^k L_{Hi} \equiv \sum_{i=1}^k L_{3i}$ і $L_{\Pi} = \sum_{j=1}^k L_{\Pi j} \equiv \sum_{i=1}^k L_{\Pi<i>}$, $L_{\Pi n.} = \sum_{j=2}^k L_{\Pi n.j} \equiv \sum_{i=1}^{k-1} L_{\Pi<i>n.}$, $L_{\Pi v.} = \sum_{j=1}^{k-1} L_{\Pi v.j} \equiv \sum_{i=2}^k L_{\Pi<i>v.}$, $L_{3j} = \sum_{j=1}^k L_{3j} \equiv \sum_{j=1}^k L_{Hj}$) в альтернативних

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

категоріях пересування, сукупного (частинні показники вибуття та прибуття) та за напрямом (прогресивного вибуття та прибуття, регресивного вибуття та прибуття; часткові показники), та нерухомості, не переходу з рівня та залишення на рівні (частинні показники), на тому чи іншому опорному рівні i (j) або поза нього (рівневі показники), а також на будь-якому рівні або поза нього (групові та загальні показники). По-друге, до абсолютних належать і балансові показники пересування, які визначаються як абсолютне сальдо пересування (« Δ ») й як оборот його рухомих одиниць (« Σ »).

Агрегати L_{Bij} і L_{Piij} , через які можна виразити будь-яку складову балансу, є парними рівневими показниками пересування. Їх різниця ΔL_{ij} , що представляє пересування одиниць об'єкта між парою рівнів i й j , являє собою *сальдо міжрівневого пересування*. Якщо $\Delta L_{ij} < 0$ ($\Delta L_{ij} > 0$), сальдо кваліфікується як *втрати (поповнення)* об'єкта щодо ознаки, вимірюваної в n_{ij} його одиниць.

Сальдо міжрівневого пересування можна представити інакше, якщо розглядати пересування одиниць об'єкта на опорному рівні p у його взаємодії з двома іншими рівнями i й j ($i \neq j$) або одним рівнем ($i = j$). Тоді різниця $\Delta L_p^{(ij)} = L_{Piip} - L_{Bpj}$ характеризує p -рівневі(-е) втрати ($\Delta L_p^{(ij)} < 0$) або поповнення ($\Delta L_p^{(ij)} > 0$) об'єкта, а різниця $\Delta L_{ij}^{(p)} = L_{Ppj} - L_{Bip}$ характеризує поза p -рівневі(-е) втрати ($\Delta L_{ij}^{(p)} < 0$) або поповнення ($\Delta L_{ij}^{(p)} > 0$) об'єкта, що мають місце внаслідок міжрівневого заміщення n_{pj} одиниць, вибулих з рівня p на рівень j , n_{ip} одиницями, прибулими з рівня i на рівень p . Сальдо міжрівневого пересування (міжрівневе заміщення) є канонічною формою міжрівневого балансу – через нього може визначатися будь-який інший абсолютний балансовий показник пересування [1]. Щодо останніх, усі можливі їх конструкції, створені через відповідні складові балансу, представлені всередині таблиць 1-3. Абсолютні показники обороту визначаються в тих же самих видових категоріях через ті ж самі складові, тільки як сума останніх (в їх позначенні символ « Δ » треба замінити на символ « Σ »; окремо не наводяться з-за їх аналогії з абсолютним сальдо).

Кожен окремий рівневий показник (загальний показник) сальдо об'єкта та кожен окремий відповідний рівневий показник (груповий показник) сальдо сукупного пересування – або ΔL_p , або $\Delta L_{(p)}$, або ΔL_{Bi} , або ΔL_{Pj} (ΔL) – це один і той же показник, тільки визначений в різні способи. У першому випадку – це різниця однотипних альтернативних складових структури об'єкта, в другому випадку – це різниця однотипних альтернативних складових структури пересування. Через тотожність складових балансу з альтернативних видових категорій нерухомості, які входять до складу структури об'єкта та взаємно скорочуються при відніманні складових цієї структури, обидва способи обчислення шуканих показників дають однаковий результат. Щодо аналогічних показників обороту, вони обчислюються лише через складові пересування як рівневі та групові показники сукупного обороту.

Відносні агреговані показники міжрівневого балансу в табл. 1-3 представлені в усіх категоріях за критерієм «призначення» та визначаються як коефіцієнт або процент. Охарактеризуємо їх.

Показники структури об'єкта Ω_{i0} ($\Omega_{<j>0}$) і Ω_{j1} ($\Omega_{<i>1}$) характеризують питому вагу (відсоток) сукупного значення ознаки, вимірюваної в його одиниць в кожному окремо взятому стані на тому чи іншому рівні (поза нього) в сукупному розмірі ознаки, вимірюваної в цьому ж стані в усіх одиниць об'єкта. Зміна рівневої структури об'єкта характеризується темпом зростання ознаки T_{3p} ($T_{3<p>}$), яким порівнюється між собою значення сукупного p -рівневого (поза p -рівневого) розміру ознаки, вимірюваної у станах «після» і «до».

Таблиця 1

Рівневі показники міжрівневого балансу

Складова		Зменшуване (чисельник)																				
Вид		Парний		Частинний										Частковий								
Познач.	L_{Bij}	$L_{\Pi ij}$	L_{i0}	$L_{\langle j \rangle 0}$	L_{j1}	$L_{\langle i \rangle 1}$	L_{Bi}	$L_{B\langle j \rangle}$	$L_{\Pi j}$	$L_{\Pi \langle i \rangle}$	L_{Hi}	L_{3j}	L_{Biv}	L_{Bin}	$L_{Bv\langle j \rangle}$	$L_{Bn\langle j \rangle}$	$L_{\Pi n.j}$	$L_{\Pi v.j}$	$L_{\Pi \langle i \rangle n}$	$L_{\Pi \langle i \rangle v}$		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
Від'ємник (знаменник)	L_{Bij}	\hat{C}_{Bij}^{pm}																				
	$L_{\Pi ij}$		$\hat{C}_{\Pi ij}^{pm}$																			
	L_{i0}	Ω_{1Bij}		$\hat{C}_i^{p_0}$		$\frac{\Delta L_p}{T_{3p}}$	ΔL_{Bi}	Ω_{1Bi}			Ω_{1Hi}			Ω_{1Biv}	Ω_{1Bin}							
	$L_{\langle j \rangle 0}$	$\Omega_{1Bi\langle j \rangle}$		$\hat{C}_{\langle j \rangle 0}^{p_0}$	$\Delta L_{\Pi j}$	$\frac{\Delta L_{\langle p \rangle}}{T_{3\langle p \rangle}}$		$\Omega_{1B\langle j \rangle}$			$\Omega_{1H\langle j \rangle}$				$\Omega_{1Bv\langle j \rangle}$	$\Omega_{1Bn\langle j \rangle}$						
	L_{j1}		$\Omega_{1\Pi ij}$		$\hat{C}_j^{p_1}$				$\Omega_{1\Pi j}$			Ω_{13j}						$\Omega_{1\Pi n.j}$	$\Omega_{1\Pi v.j}$			
	$L_{\langle i \rangle 1}$		$\Omega_{1\Pi \langle i \rangle j}$			$\hat{C}_{\langle i \rangle 1}^{p_1}$				$\Omega_{1\Pi \langle i \rangle}$		$\Omega_{13\langle i \rangle}$								$\Omega_{1\Pi \langle i \rangle n}$	$\Omega_{1\Pi \langle i \rangle v}$	
	L_{Bi}	Ω_{2Bij}						$\hat{C}_{Bi}^{p_i}$	ΔL_p $В\hat{C}\Pi_p$	ΔL_{Bi} $В\hat{C}\Pi_{(B)i}$				Ω_{2Biv}	Ω_{2Bin}							
	$L_{B\langle j \rangle}$	$\Omega_{2Bi\langle j \rangle}$						$\hat{C}_{B\langle j \rangle}^{p_j}$	$\Delta L_{\Pi j}$ $В\hat{C}\Pi_{(\Pi)j}$	$\Delta L_{\langle p \rangle}$ $В\hat{C}\Pi_{\langle p \rangle}$					$\Omega_{2Bv\langle j \rangle}$	$\Omega_{2Bn\langle j \rangle}$						
	$L_{\Pi j}$		$\Omega_{2\Pi ij}$						$\hat{C}_{\Pi j}^{p_j}$										$\Omega_{2\Pi n.j}$	$\Omega_{2\Pi v.j}$		
	$L_{\Pi \langle i \rangle}$		$\Omega_{2\Pi \langle i \rangle j}$							$\hat{C}_{\Pi \langle i \rangle}^{p_i}$											$\Omega_{2\Pi \langle i \rangle n}$	$\Omega_{2\Pi \langle i \rangle v}$
	L_{Hi}							$\hat{C}_{Hi}^{p_i}$	$\hat{C}_{H\langle p \rangle}^{p_i}$			$\hat{C}_{Hi}^{p_i}$										
	L_{3j}									$\hat{C}_{3j}^{p_j}$	$\hat{C}_{3\langle p \rangle}^{p_j}$		$\hat{C}_{3j}^{p_j}$									
	L_{Biv}	Ω_{3Bij}												$\hat{C}_{Biv}^{p_i}$	$\hat{C}_{Bv}^{p_i}$					$\Delta L_{p \frac{H}{B}}$ $В\hat{C}\Pi_{p \frac{H}{B}}$	$\Delta L_{p \frac{H}{B}}$ $В\hat{C}\Pi_{p \frac{H}{B}}$	$\Delta L_{i \frac{H}{B}}$ $В\hat{C}\Pi_{i \frac{H}{B}}$

Закінчення табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
Від'ємник (знаменник)	$L_{ВiH.}$													$\hat{C}_{Bp_{H.}^B}$	$\hat{C}_{B_i^{p_{H.}}}$			$\Delta L_{p_{H.}}$ $В\hat{C}П_{p_{H.}}$	$\Delta L_{p_{H.}^B}$ $В\hat{C}П_{p_{H.}^B}$	$\Delta L_{i_{H.}^B}$ $В\hat{C}П_{i_{H.}^B}$	$\Delta L_{i_{H.}}$ $В\hat{C}П_{i_{H.}}$	
	$L_{ВВ.<j>}$	$\Omega_{3Вi<j>}$														$\hat{C}_{ВВ.<j>^B}$	$\hat{C}_{В_{В.<j>}^H}$	$\Delta L_{H.<j>}$ $В\hat{C}П_{H.<j>}$	$\Delta L_{H.<j>^B}$ $В\hat{C}П_{H.<j>^B}$	$\Delta L_{<p>_{В.<j>}^H}$ $В\hat{C}П_{<p>_{В.<j>}^H}$	$\Delta L_{<p>_{В.<j>}}$ $В\hat{C}П_{<p>_{В.<j>}}$	
	$L_{ВH.<j>}$														$\hat{C}_{В_{В.<j>}^B}$	$\hat{C}_{ВH.<j>^H}$	$\Delta L_{H.<j>^B}$ $В\hat{C}П_{H.<j>^B}$	$\Delta L_{В.<j>}$ $В\hat{C}П_{В.<j>}$	$\Delta L_{<p>_{H.}}$ $В\hat{C}П_{<p>_{H.}}$	$\Delta L_{<p>_{В.<j>}^B}$ $В\hat{C}П_{<p>_{В.<j>}^B}$		
	$L_{ПH.j}$	$\Omega_{3Пij}$																$\hat{C}_{ПH.j^B}$	$\hat{C}_{П_{H.j}^B}$			
	$L_{ПВ.j}$																		$\hat{C}_{П_{В.j}^H}$	$\hat{C}_{ПВ.j^B}$		
	$L_{П<i>H.}$	$\Omega_{3П<i>j}$																		$\hat{C}_{П<i>_{H.}^B}$	$\hat{C}_{П<p>_{H.}^B}$	
	$L_{П<i>В.}$																			$\hat{C}_{П<p>_{В.}^H}$	$\hat{C}_{П<i>_{В.}^B}$	
	N_{i0}				\bar{L}_{i0}			$\bar{L}_{<i>1}$														
	N_{j1}				$\bar{L}_{<j>0}$	\bar{L}_{j1}																
	N_{Bi}								\bar{L}_{Bi}			$\bar{L}_{П<i>}$										
	$N_{Пj}$									$\bar{L}_{В<j>}$	$\bar{L}_{Пj}$											
	N_{Hi}											\bar{L}_{Hi}	\bar{L}_{3i}									
	N_{3j}											\bar{L}_{Hj}	\bar{L}_{3j}									
	$N_{ВiВ.}$														$\bar{L}_{ВiВ.}$						$\bar{L}_{П<i>H.}$	
	$N_{ВiH.}$															$\bar{L}_{ВiH.}$						$\bar{L}_{П<i>В.}$
	$N_{ПH.j}$																$\bar{L}_{ВВ.<j>}$		$\bar{L}_{ПH.j}$			
	$N_{ПВ.j}$																	$\bar{L}_{ВH.<j>}$		$\bar{L}_{ПВ.j}$		

Таблиця 2

Групові показники міжрівневого балансу

Складова	Зменшене (чисельник)																										
	Вид	Парний		Частинний									Частковий														
	Познач.	L_{Bij}	$L_{Pi j}$	L_{Bi}	$L_{B(j)}$	L_{Pj}	$L_{P(i)}$	L_{Hi}	L_{3j}	L_B	L_P	L_H	L_3	$L_{Biv.}$	$L_{Bin.}$	$L_{Bv.(j)}$	$L_{Bn.(j)}$	$L_{Pn.j}$	$L_{Pv.j}$	$L_{P(i)n.}$	$L_{P(i)v.}$	$L_{Bv.}$	$L_{Bn.}$	$L_{Pn.}$	$L_{Pv.}$		
Від'ємник (знаменник)	L_B	Ω_{4B}		Ω_{2Bi}	$\Omega_{2B(j)}$					$\frac{\Delta L}{BC\Pi}$				$\Omega_{3Biv.}$	$\Omega_{3Bin.}$	$\Omega_{3Bv.(j)}$	$\Omega_{3Bn.(j)}$					$\Omega_{1Bv.}$	$\Omega_{1Bn.}$				
	L_P		$\Omega_{4Pi j}$			Ω_{2Pj}	$\Omega_{2P(i)}$											$\Omega_{3Pn.j}$	$\Omega_{3Pv.j}$	$\Omega_{3P(i)n.}$	$\Omega_{3P(i)v.}$				$\Omega_{1Pn.}$	$\Omega_{1Pv.}$	
	L_H						Ω_{2Hi}		$\hat{C}_{\frac{B}{H}}$																		
	L_3							Ω_{23j}		$\hat{C}_{\frac{P}{3}}$																	
	$L_{Bv.}$													$\Omega_{4Biv.}$		$\Omega_{4Bv.(j)}$							$\hat{C}_{\frac{B^H}{B}}$	$\frac{\Delta L_{B^H}}{BC\Pi_{B^H}}$	$\frac{\Delta L_{B^H}}{BC\Pi_{B^H}}$		
	$L_{Bn.}$		Ω_{5B}												$\Omega_{4Bin.}$		$\Omega_{4Bn.(j)}$						$\hat{C}_{\frac{B^B}{H}}$	$\frac{\Delta L_{H^B}}{BC\Pi_{H^B}}$	$\frac{\Delta L_{H^B}}{BC\Pi_{H^B}}$		
	$L_{Pn.}$																	$\Omega_{4Pn.j}$		$\Omega_{4P(i)n.}$						$\hat{C}_{\frac{P^B}{H}}$	
	$L_{Pv.}$		$\Omega_{5Pi j}$																$\Omega_{4Pv.j}$		$\Omega_{4P(i)v.}$				$\hat{C}_{\frac{P^B}{B}}$		
	N_B									\bar{L}_B																	
	N_P										\bar{L}_P																
	N_H											\bar{L}_H															
	N_3												\bar{L}_3														
	$N_{Bv.}$																					$\bar{L}_{Bv.}$					
	$N_{Bn.}$																						$\bar{L}_{Bn.}$				
	$N_{Pn.}$																							$\bar{L}_{Pn.}$			
$N_{Pv.}$																									$\bar{L}_{Pv.}$		

Таблиця 3

Загальні показники міжрівневого балансу

Складова	Зменшуване (чисельник)																		
	Вид	Парний									Частинний								
	Позн.	L_{Bij}	$L_{Pi j}$	L_{i0}	$L_{(j)0}$	L_{j1}	$L_{(i)1}$	L_{Bi}	$L_{B(j)}$	L_{Pj}	$L_{P(i)}$	L_{Hi}	L_{3j}	L_0	L_1	L_B	L_P	L_H	L_3
Від'ємник (знаменник)	L_0	Ω_{6Bi}		Ω_{i0}	$\Omega_{(j)0}$			Ω_{3Bi}	$\Omega_{3B(j)}$			Ω_{3Hi}			ΔL	Ω_B		Ω_H	
	L_1		Ω_{6Pi}			Ω_{j1}	$\Omega_{(i)1}$			Ω_{3Pj}	$\Omega_{3P(i)}$		Ω_{33j}				Ω_P		Ω_3
	N													\bar{L}_0	\bar{L}_1				
Від'ємник (знаменник)	Вид	Частковий																	
	Позн.	$L_{Biv.}$	$L_{Bin.}$	$L_{Bv.(j)}$	$L_{Bn.(j)}$	$L_{Pn.j}$	$L_{Pv.j}$	$L_{P(i)n.}$	$L_{P(i)v.}$	$L_{Bv.}$	$L_{Bn.}$	$L_{Pn.}$	$L_{Pv.}$						
	L_0	$\Omega_{5Biv.}$	$\Omega_{5Bin.}$	$\Omega_{5Bv.(j)}$	$\Omega_{5Bn.(j)}$					$\Omega_{2Bv.}$	$\Omega_{2Bn.}$								
L_1					$\Omega_{5Pn.j}$	$\Omega_{5Pv.j}$	$\Omega_{5P(i)n.}$	$\Omega_{5P(i)v.}$			$\Omega_{2Pn.}$	$\Omega_{2Pv.}$							
N																			

Показники структури руху характеризують її в кожній окремо взятій категорії останнього: як коефіцієнти вибуття (« Ω_B ») і прибуття (« Ω_P »), у тому числі за напрямом (« $\Omega_{Bv.}$ », « $\Omega_{Bn.}$ » і « $\Omega_{Pn.}$ », « $\Omega_{Pv.}$ ») – в категорії «пересування»; як коефіцієнти не переходу з рівня (« Ω_H ») і залишення на рівні (« Ω_3 ») – в категорії «нерухомість». Якщо та чи інша агрегована складова пересування або нерухомості порівнюється з агрегованою складовою балансу, представленою обома цими категоріями руху разом, то такий коефіцієнт відноситься до показників інтенсивності руху.

З чотирьох видів балансових показників пересування в таблицях 1-3 розміщені лише коефіцієнти відносного сальдо пересування («ВСП»), яким характеризується співвідношення однотипних складових балансу, представлених в категоріях пересування «прибуття» (порівнювана складова) та «вибуття» (база порівняння).

Показники координації («С») поділяються на коефіцієнти координації руху та на коефіцієнти координації пересування (нерухомості). Перші порівнюють між собою однотипні складові балансу з альтернативних категорій руху в кожному з обох станів об'єкта: складові «вибуття» та «не переходу з рівня» – у стані «до»; складові «прибуття» та «залишення на рівні» – у стані «після». Другі порівнюють між собою однотипні складові балансу в одній і тій же самій категорії пересування (нерухомості).

Висновки відповідно до статті. Завдяки моделі міжрівневого балансу, синтезованій раніше в агрегатній формі, вдалося сформувати систему агрегованих показників міжрівневого балансу (руху), розділивши їх на окремі видові категорії за різними критеріями. Ними забезпечується всебічна оцінка наслідків керуючого впливу на структурований об'єкт, пояснюється зміна його структури щодо ознаки, вимірюваної в його одиниць в шкалі відношень, а також уможливується оцінка ефективності керуючого впливу. Показники міжрівневого балансу закономірно пов'язані між собою через співвідношення балансу, що можна довести у вигляді теорем і канонічних форм балансу, що є предметом подальшого дослідження. Для інформаційних систем, в яких об'єктом керування стає структуроване середовище, в якому здійснюється зберігання, обробка та передача даних, подібна система показників може бути корисною для розв'язання задач по ефективності організації інформаційного процесу: для зниження витрат часу, праці, енергії та матеріальних ресурсів.

Список використаних джерел

1. Дубягін О. Б. Модель міжрівневого балансу: агрегатна форма. *Технічні науки та технології: науковий журнал*. 2018. № 3 (13). С. 96–104.
2. Терехов Л. Л. Экономико-математические методы. Москва: Статистика, 1968. 360 с.
3. Плошко Б. Г. Группировка и системы статистических показателей. Москва: Статистика, 1971. 176 с.
4. Суслов И. П. Теория статистических показателей. Москва: Статистика, 1975. 264 с.
5. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник для вузов. Изд. 9-е стереотипное. Москва: Высшая школа, 2003. 479 с.
6. Елисеєва І. І., Юзбашев М. М. Общая теория статистики: Учебник / под ред. И. И. Елисеевой. 5-е изд., перераб. и доп. Москва: Финансы и статистика, 2004. 656 с.
7. Общая теория статистики: Статистическая методология в изучении коммерческой деятельности: учебник / А. И. Харламов и др.; под ред. А. А. Спирина, О. Э. Башинной. Москва: Финансы и статистика, 1994. 296 с.
8. Статистика: підручник / С. С. Герасименко та ін.; за наук. ред. д-ра екон. наук С. С. Герасименка. 2-ге вид., перероб. і доп. Київ: КНЕУ, 2000. 467 с.
9. Вашків П. Г., Пастер П. І., Сторожук В. П., Ткач Є. І. Теорія статистики: навчальний посібник. Київ: Либідь, 2001. 320 с.
10. Теория статистики: учебник / под ред. проф. Р. А. Шмойловой. Москва: Финансы и статистика, 2014. 656 с.

References

1. Dubiahin, O. B. (2018). *Balansovyi metod statystychnoho analizu rezultativ pedahohichnoho eksperymentu [Balance method of statistical analysis of pedagogical experiment results]*. Chernihiv: ChNTU [in Ukrainian].
2. Terekhov, L. L. (1968). *Ekonomiko-matematicheskie metody [Economic and mathematical methods]*. Moscow: Statistika [in Russian].
3. Ploshko, B. G. (1971). *Gruppirovka i sistemy statisticheskikh pokazatelei [Grouping and systems of statistical indicators]*. Moscow: Statistika [in Russian].
4. Suslov, I. P. (1975). *Teoriia statisticheskikh pokazatelei [Theory of Statistical Indicators]*. Moscow: Statistika [in Russian].
5. Gmurman, V. E. (2003). *Teoriia veroiatnostei i matematicheskaia statistika [Theory of Probability and Mathematical Statistics]*. Moscow: Vysshiaia shkola [in Russian].
6. Eliseeva, I. I., Iuzbashev, M. M. (2004). *Obshchaia teoriia statistiki [General theory of statistics]*. Moscow: Finansy i statistika [in Russian].
7. Spirina, A. A., Bashina, O. E. (Eds.) (1994). *Obshchaia teoriia statistiki: Statisticheskaiia metodologiia v izuchenii kommercheskoi deiatelnosti [General Theory of Statistics: Statistical Methodology for the Study of Commercial Activities]*. Moscow: Finansy i statistika [in Russian].
8. Herasymenko, S. S. (Ed.) (2000). *Statystyka [Statistics]*. Kyiv: KNEU [in Ukrainian].
9. Vashkiv, P. H., Paster, P. I., Storozhuk, V. P., Tkach, Ye. I. (2001). *Teoriia statystyky [Statistics Theory]*. Kyiv: Lybid [in Ukrainian].
10. Shmoilova, R. A. (2014). *Teoriia statistiki [Statistics Theory]*. Moscow: Finansy i statistika [in Russian].

UDC 311+512

Alexander Dubyagin, Volodymyr Guryev

THE SYSTEM OF INDICATORS OF INTER-LEVEL BALANCE: AGGREGATE FORM

Urgency of the research. The system of indicators of inter-level balance, defined in the aggregate form, provides a comprehensive quantitative assessment of the structural shifts in the controlled object of observation, including the estimation of its losses (replenishment) based on the attribute measured in its units in the ratio scale.

Target setting. Such an assessment is not possible on the basis of inter-level balance indicators, which were formulated earlier and defined only through unweighted (non-aggregated) components of the balance.

Actual scientific researches and issues analysis. Non-aggregated balance sheet indicators proposed earlier were calculated in terms of the number of movable and immovable units of the object.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Uninvestigated parts of general matters defining. Evaluation of the effects of a control action on a structured object that is performed in the values of the measured attribute and is explained by the inter-level movement of units of this object.

The research objective. Create a system of inter-level balance indicators in accordance with their classification, proposed earlier, by formulating the rules for calculating them in aggregate form.

The statement of basic materials. The systematization of the components of inter-level balance, made in the aggregate form in accordance with the categories of inter-level movement, makes it possible to calculate balance indicators, only in the level values of the measured attribute, for which the number of movable and immovable units of the object plays the role of weight. In accordance with the classification of inter-level balance indicators, their various constructions are defined in the categories "purpose", "signs of movement", "method of calculation", "degree of aggregation" and "limits of movement". The order of calculation also depends on how the feature is measured, either at the reference level or outside it.

Conclusions. The proposed indicators of the inter-level balance comprehensively assess the consequences of the control impact on the structured object and the effectiveness of this impact.

Keywords: aggregate form; categories of motion; classification criteria; inter-level balance; system of indicators.

Table: 3. Fig.: 1. References: 10.

Дубягін Олександр Борисович – кандидат технічних наук, доцент, м. Чернігів, Україна.

Dubyagin Alexander – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernigov, Ukraine.

E-mail: aleksandrdubagin@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9512-242X>

ResearcherID: G-9774-2014

Гур'єв Володимир Іванович – кандидат технічних наук, доцент, м. Чернігів, Україна.

Guryev Volodymyr – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernigov, Ukraine.

E-mail: guryev54@ukr.net

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9507-5408>

ResearcherID: G-9807-2016

РОЗДІЛ III. ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

УДК 004.085

DOI: 10.25140/2411-5363-2019-1(15)-162-171

Павел Аникин, Евгений Беляк

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МНОГОУРОВНЕВОГО КОДИРОВАНИЯ ДАНЫХ ПРИ МНОГОСЛОЙНОЙ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ ЗАПИСИ ИНФОРМАЦИИ

Актуальность темы исследования. Метод цифровой регистрации информации, которая осуществляется через кодирование информационных элементов в виде микрорельефных структур с последующим бесконтактным считыванием информации лазерным лучом, рассматривается как наиболее перспективный подход при организации систем долговременного хранения данных.

Постановка проблемы. Тем не менее, показатели информационной емкости и скорости считывания данных современных оптических носителей не соответствуют требованиям в области цифровой записи. Причиной низкой плотности цифровой оптической записи является дифракционный предел, который вносит ограничения на разрешающую способность оптических систем.

Анализ последних исследований и публикаций. Исследования в данной области показывают приоритет инновационных разработок, связанных с объемной оптической записью, в частности многослойной фотолюминесцентной записи, над комплексными решениями, которые позволяют увеличить поверхностную плотность записи и включают применение сложных субдифракционных оптических систем.

Выделение неисследованных частей общей проблемы. Разработчики запоминающих устройств данного типа указывают на характерные проблемы многослойной фотолюминесцентной записи: малую скорость считывания данных и низкий уровень сигнала считывания.

Постановка задачи. В данной работе была предложена методика объемной оптической записи информации в многослойных, оптически однородных средах с фотолюминесцентными информационными элементами многоуровневого кодирования.

Изложение основного материала. Для определения оптимальных параметров данного запоминающего устройства и оптической системы регистрации информации была разработана математическая модель процесса фотолюминесцентной записи.

Выводы в соответствии со статьей. Задача поиска оптимальной конфигурации оптической системы была решена через нахождение экстремумов целевых функций.

Ключевые слова: оптическая запись информации; системы долговременного хранения данных; многоуровневое кодирование; многослойный фотолюминесцентный носитель информации; сигнал считывания; паразитный сигнал; целевая функция; экстремум функции.

Рис.: 7. Библ.: 11.

Актуальность темы исследования. Стандартный подход в оптической записи информации состоит в кодировании данных в виде микрорельефных структур на отражающем слое носителя с последующим бесконтактным считыванием данных сфокусированным лазерным лучом. Данный метод рассматривается как наиболее перспективный подход при организации энергонезависимых систем долговременного хранения информации, что указывает на актуальность работ в области оптической регистрации информации, в то время как магнитные и твердотельные запоминающие устройства в принципе не рассматриваются как архивные накопители информации.

Постановка проблемы. В то же время показатели информационной емкости и скорости регистрации информации оптических носителей типа «Blu-ray Disc» (BD) не соответствуют требованиям в области современной цифровой записи; более того, с целью увеличения плотности записи разработчики в значительной степени пожертвовали показателем надежности хранения информации на данных носителях [1-3]. Ключевым фактором, который обуславливает проблему низкой плотности оптической записи информации, является дифракционный предел оптических систем, который вносит ограничения на максимальное значение разрешающей способности и, соответственно, минимальный размер информационного элемента [1-3].

Анализ последних исследований и публикаций. Анализ научных публикаций в данной области указывает на способы решения дифракционного разрешения, которые можно разделить на три группы:

- оптическая запись в пределах дифракционного ограничения [1; 2];
- использование субдифракционных оптических систем [2; 3];
- использование методов объемной оптической записи [1-7].

Минимальное значение информационного элемента дифракционно ограниченной оптической системы определяется через диаметр диска Эйри, сфокусированного светового пятна, выделенного по относительному уровню интенсивности освещения по отношению к точки фокуса как $1/e$. Диаметр кружка Эйри зависит от длины волны излучения лазера λ , числовой апертуры объектива NA и коэффициента k , который зависит от диафрагмы оптической системы:

$$\begin{cases} d = k \frac{\lambda}{NA} \\ NA = n \cdot \sin(\alpha) \end{cases} \quad (1)$$

То есть, для увеличения плотности оптической записи в рамках использования дифракционно ограниченной оптической системы необходимо добиваться уменьшения длины волны излучения лазера λ и увеличение числовой апертуры объектива NA . При этом следует отметить, что для оптических носителей BD был достигнут предел по длине волны излучения лазера для видимого диапазона ($\lambda = 405$ нм) и числовой апертуры ($NA = 0,85$ и, соответственно, апертурный угол $\alpha = 120^\circ$). Дальнейшее уменьшение диаметра диска Эйри требует внедрения громоздких ультрафиолетовых лазеров, вакуумных систем и технологически сложных подходов иммерсионной записи, которые позволяют получить значение $NA > 1$.

В свою очередь, субдифракционные оптические системы также являются технологически сложными комплексами, их применение существенно уменьшает скорость считывания данных, и, соответственно, они в большей степени подходят для оптической микроскопии [2]. Поэтому актуальным подходом является переход от методов увеличения плотности поверхностной записи к разработке принципов объемной оптической записи [3-7]. При этом наиболее перспективным методом объемной оптической записи является разработка оптически прозрачных, однородных и анизотропных регистрирующих сред, с многослойными структурами фотолуминесцентных (ФЛ) информационных элементов. Данный тип носителя позволяет считывать данные с большого количества без переотражения лазерного пучка системы считывания, что характерно для отражающих носителей [1-3].

Выделение неисследованных частей общей проблемы. Тем не менее, следует указать на основные недостатки многослойной ФЛ записи информации, которые приводят к уменьшению надежности и эффективности данного типа носителей. Это в первую очередь низкие показатели скорости считывания данных уровня сигнала считывания, связанные с особенностями ФЛ отклика, а также высокий уровень паразитного сигнала, связанный с засветкой информационных элементов соседних слоев расфокусированным лазерным лучом [1-3]. Также для ФЛ многослойных носителей информации в отличие от отражательных дисков (CD, DVD, BD, UDO) не разработано единой методологии определения оптимальной архитектуры оптической системы считывания и параметров запоминающего устройства, не смотря на большое количество отдельных исследований, посвященных данному вопросу.

Постановка задачи. В данной работе предложен целостный подход построения ФЛ многослойных носителей информации РММ (Photoluminescent Multilayer Media) с компактной оптической системой однофотонного считывания данных. При этом проблему низкой скорости ФЛ считывания данных при этом было предложено решить через мно-

гоуровневое кодирование данных. Для определения оптимальных параметров данного запоминающего устройства и оптической системы регистрации информации необходимо разработать математическую модель и систему оценки, которая базируется на сопоставлении указанных параметров и характеристик сигнала считывания. Таким образом, задача поиска оптимальной конфигурации оптической системы может быть решена через нахождение экстремумов целевых функций.

Изложение основного материала. Структура РММ-носителя включает в себя N информационных слоев и промежуточные слои, которые позволяют разделить информационные элементы каждого слоя и выделить соответствующий сигнал считывания. Тем не менее, при считывании соседние информационные слои облучаются расфокусированным лазерным лучом и дают паразитный сигнал по величине прямо пропорциональный количеству слоев и обратно пропорциональный соотношению площади информационных элементов (питов) и суммарной площади информационного слоя свободной от питов. Уровень паразитного сигнала в данном случае будет существенно меньшим, чем уровень паразитного сигнала для стандартного оптического диска с отражающими слоями. Для возможности дальнейшего увеличения количества слоев было предложено выделить паразитный сигнал как постоянный, что достигается увеличением толщины промежуточных слоев и введением периферийных ФЛ областей, что позволяют поддерживать сигнал стабильным при считывании данных с края РММ-носителя. Также для уменьшения общей площади питов было организовано кодирование информации исключительно длиной промежутков между питами (лендов), а площадь самих питов сохранить до минимальной [1-3].

Математическое моделирование процесса многослойной ФЛ записи информации осуществлялось при помощи функции Гаусса, которая описывает распределение электромагнитного поля сфокусированного лазерного луча [8; 9]:

$$\left[\begin{array}{l} I(r, z) = I_0 \left(\frac{\omega_0}{\omega(z)} \right)^2 \cdot \exp \left(-\frac{2r^2}{\omega^2(z)} \right) \\ \left\{ \begin{array}{l} \omega(z) = \omega_0 \cdot \sqrt{1 + (1/z_R)^2} \\ z_R = \pi \omega_0^2 / \lambda \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (2)$$

где $I(r, z)$ – усредненная по времени функция распределения интенсивности электромагнитного поля считывающего лазерного луча, I_0 – интенсивность лазерного луча в фокусе, $\omega_0 = d/2$ – радиус диска Эйри, z – вертикальное расстояние от фокальной плоскости (ФП), r – радиальное расстояние от перпендикуляра к ФП в точке фокуса.

На рис. 1 показан результат моделирования фокусирования лазерного луча через усредненную по времени функцию распределения интенсивности. На рис. 1, а представлена картина распределения света в ФП, разделенную изолиниями на области равной интенсивности от 90 до 10 % от интенсивности лазерного луча в фокусе, где диск Эйри выделен пунктирной линией с пометкой «1/e». Соответственно, на рис. 1, б представлен график данной функции. Можно видеть, что радиус диска Эйри соответствует точке перегиба, где у функции максимальный вертикальный наклон, соответственно при колебании чувствительности фотоэлемента головки считывания или интенсивности излучения лазера значение сигнала считывания изменяется минимально.

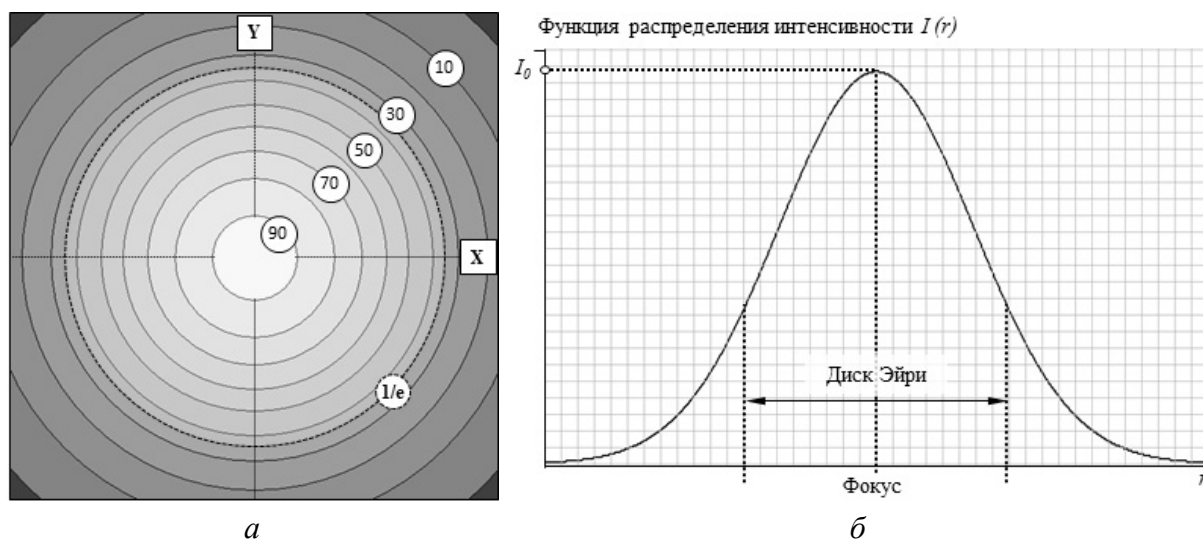


Рис. 1. Функция распределения интенсивности лазерного луча в ФП

На основе данной математической модели можно провести анализ методов увеличения поверхностной плотности оптической записи на примере стандартов оптических дисков. Оптическая система привода CD-носителя характеризуется длиной волны лазера $\lambda = 780$ нм и числовой апертурой $NA = 0,45$. Функция распределения интенсивности в ФП представлена на рис. 2, б, а на рис. 2, а изолинии наложены на площадь пита минимальной длины.

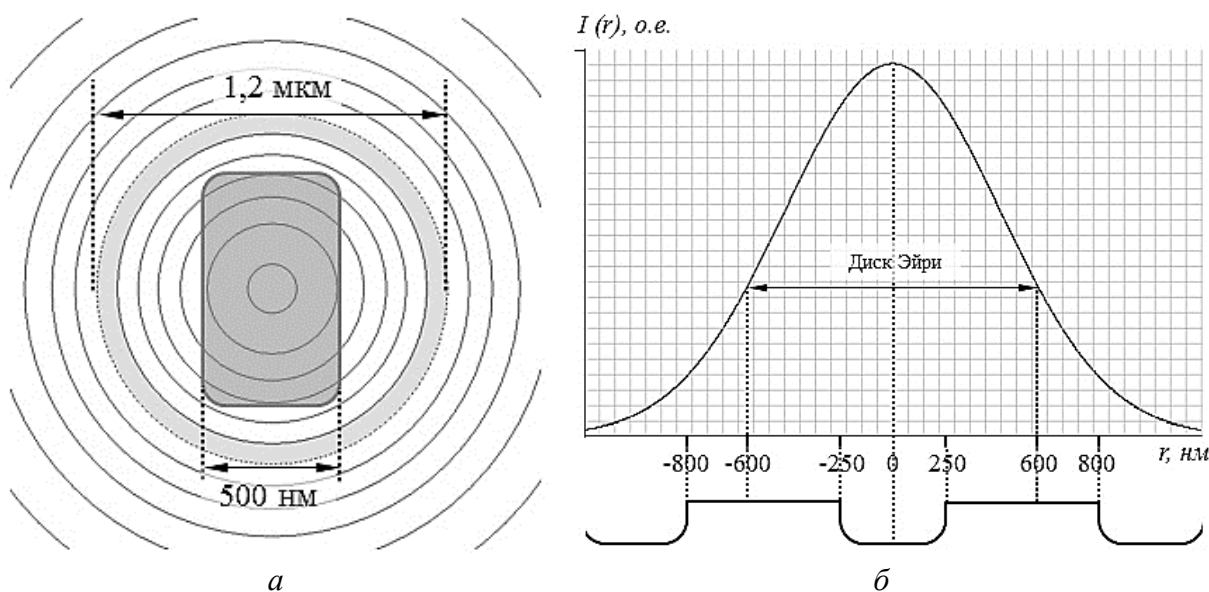


Рис. 2. Функция распределения интенсивности лазерного луча в ФП носителя CD

В оптической системе привода DVD-носителя, в свою очередь, длина волны лазера $\lambda = 650$ нм и числовой апертурой $NA = 0,6$, что позволяет увеличить разрешающую способность оптической записи и, соответственно уменьшить размер информационного элемента (рис. 3, а). При этом площадь диска Эйри (рис. 3, б) остается в пределах площади пита и промежутков между дорожками, благодаря чему уровень надежности оптической записи не уменьшается.

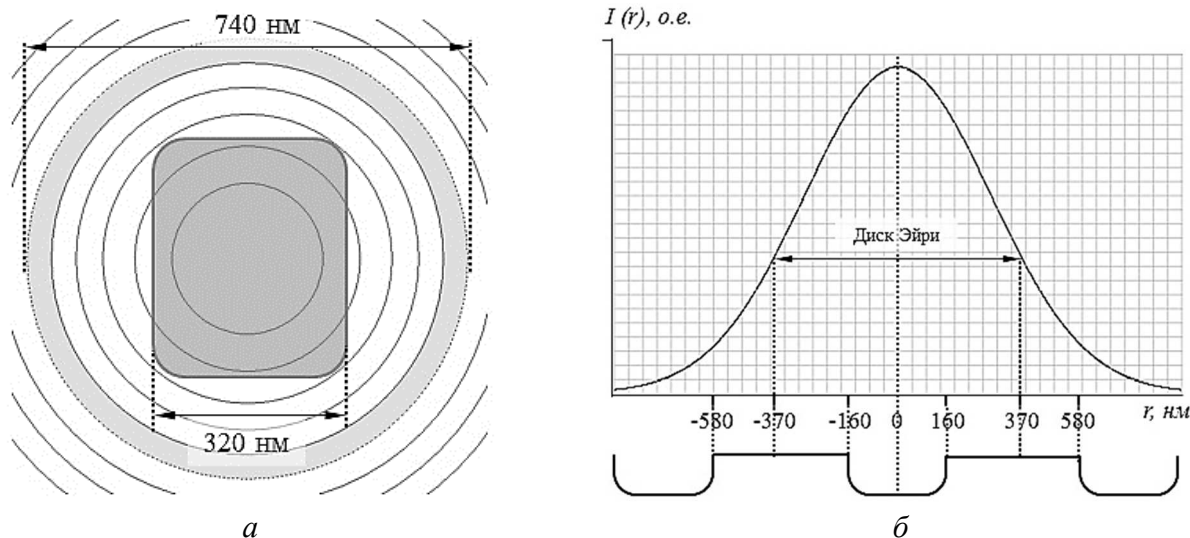


Рис. 3. Функция распределения интенсивности лазерного луча в ФП носителя DVD

В то же время оптическая система BD-привода несмотря на дальнейшее уменьшение длины волны лазера и увеличение числовой апертуры, значения которых указаны выше, не дают достаточной разрешающей способности для надежного считывания сигнала (рис. 4).

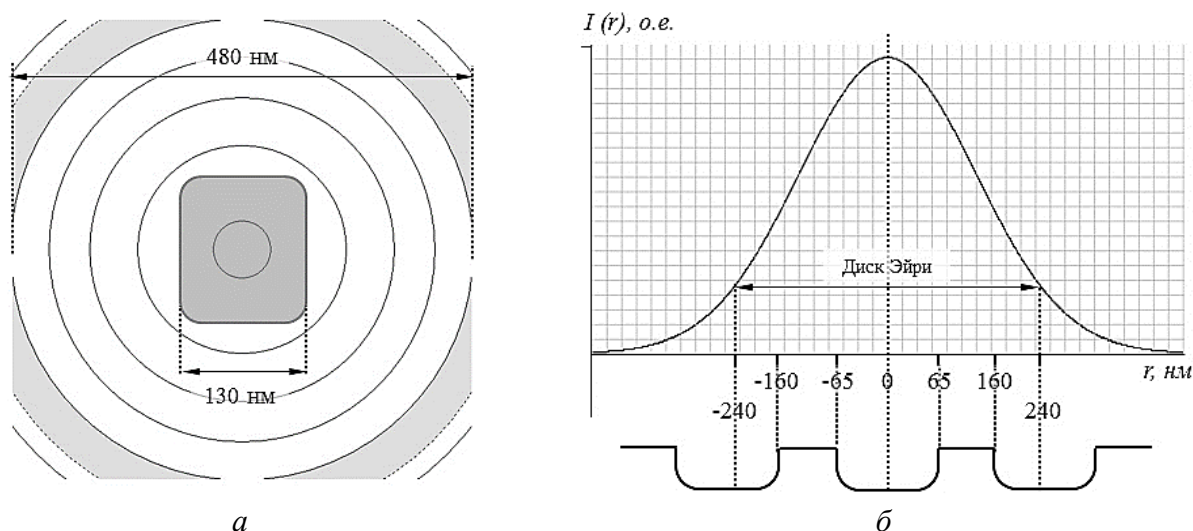


Рис. 4. Функция распределения интенсивности лазерного луча в ФП носителя BD

На рис. 4, б показано, что площадь диска Эйри частично перекрывает пики соседних дорожек, что приводит к появлению паразитного сигнала при считывании данных, который компенсируется программными алгоритмами.

В случае с отражательными оптическими дисками глубина пита определяется как четверть длины волны лазерного излучения считывающей головки, что обеспечивает полное гашение луча при его попадании на пит и полное отражение – при попадании на лэнд. В случае с ФЛ записью глубина пита может свободно варьироваться. В данной работе ее определяется через вертикальный срез усредненной по времени функция распределения интенсивности электромагнитного поля считывающего лазерного луча (рис. 5), представленной в виде изолиний (рис. 5, а) либо набора графиков двумерных функций для плоскостей расположенных на различном расстоянии от ФП (рис. 5, б). То есть, в случае объемной оптической записи от понятия диска Эйри следует перейти к трехмерной фигуре максимальной интенсивности засветки, по форме приблизительно соответствующей эллипсоиду вращения (вертикальный срез данной фигуры представляет из себя подобие эллипса (рис. 5, а).

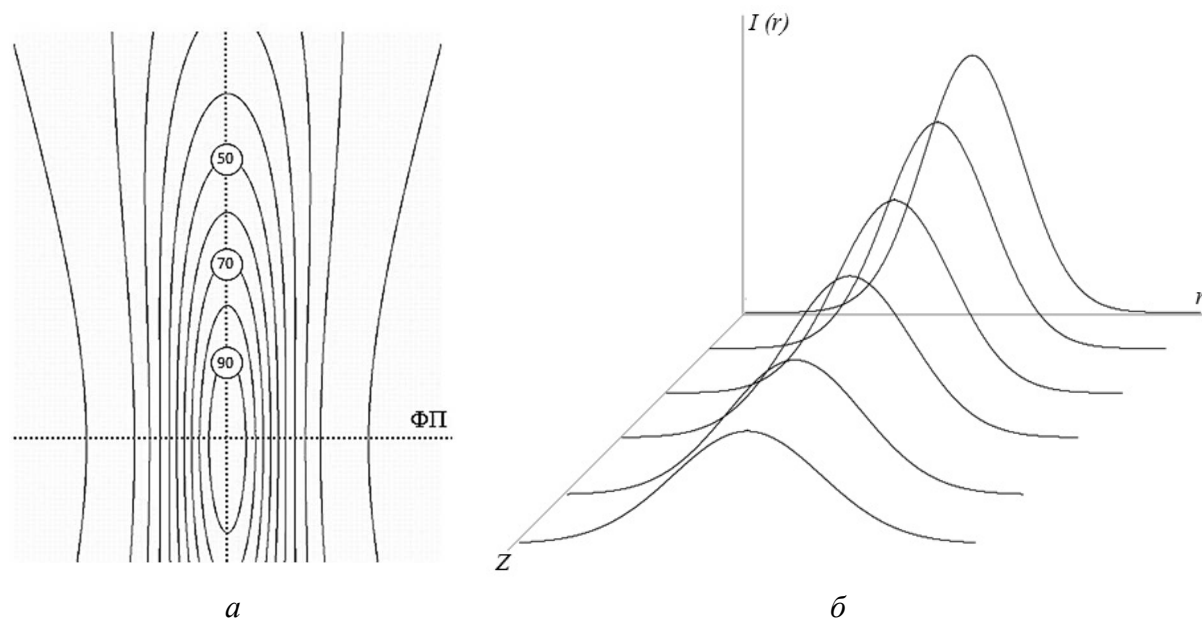


Рис. 5. Вертикальный срез функции распределения интенсивности лазерного луча

На рис. 5, а показано, что оптимальная глубина пита для ФЛ записи будет большей чем в случае оптических дисков с отражательным информационным слоем.

Поскольку было предложено кодировать данные длиной лендов, питы могут быть промоделированы в виде цилиндров. На рис. 6 представлены результаты математического моделирования для систем многослойной ФЛ записи близких по своим параметрам системам оптических приводов CD, DVD и HD-DVD. Оптическая система BD-привода была заменена на ее аналог для привода HD-DVD, поскольку апертурный угол ее головки считывания является слишком большим для объемной оптической записи и, таким образом, она подходит только для считывания данных с информационных слоев, расположенных возле поверхности носителя. Параметры оптической системы привода HD-DVD составляют $\lambda = 405$ нм и числовой апертурой $NA = 0,6$, при этом ширина пита и шаг дорожки соотносится с диаметром диска Эйри за счет достижения меньшего значения поверхностной плотности записи информации.

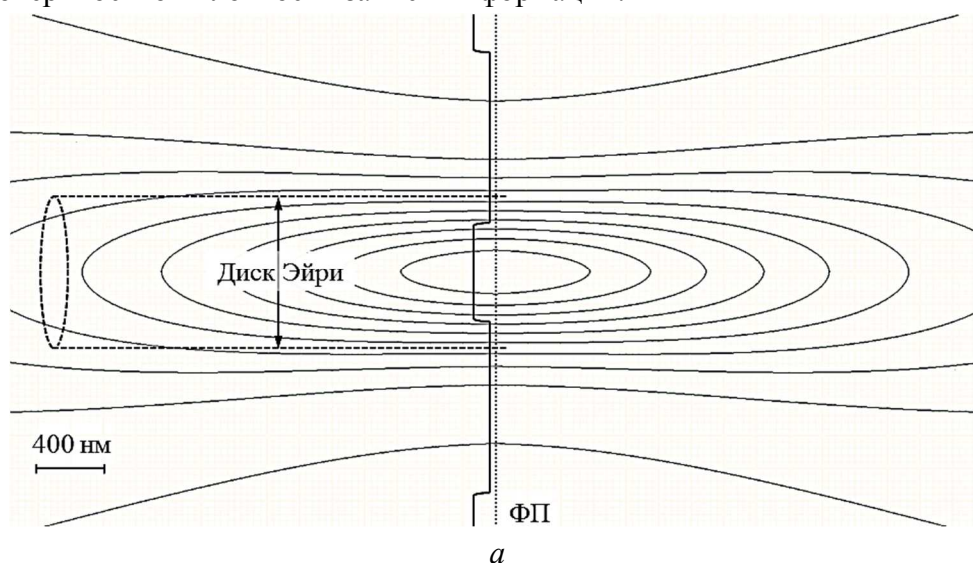


Рис. 6. Вертикальный срез функции распределения интенсивности лазерного луча для оптической системы:
 а – CD-привода; б – DVD-привода; в – HD-DVD-привода

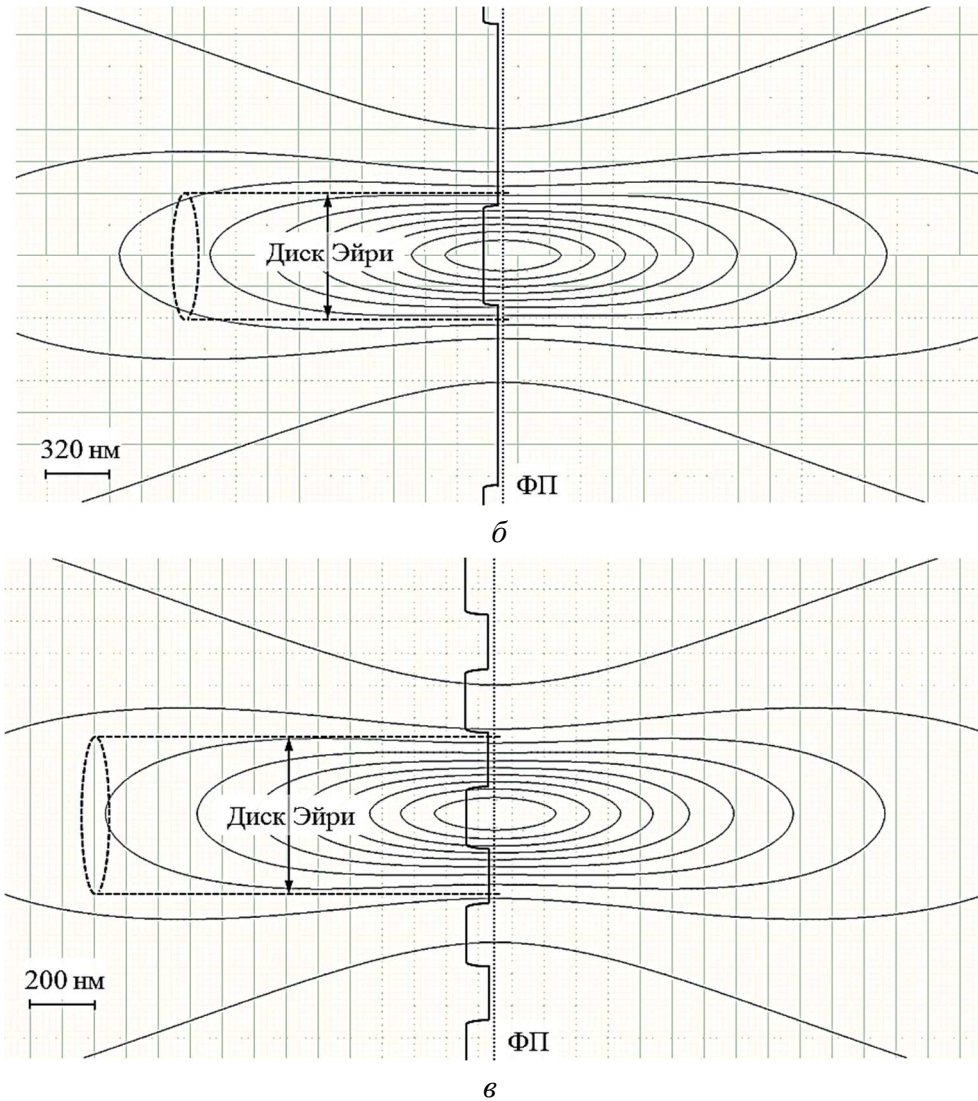


Рис. 6. Аркуш 2

Построение математической модели процесса ФЛ многослойной записи информации позволяет свести задачу поиска оптимальных параметров РММ-носителя и оптической системы его привода к математической задаче поиска экстремумов целевых функций. В качестве целевых функций при этом могут выступать общая информационная емкость запоминающего устройства и надежность воспроизведения данных, которая включает в себя показатели полезного сигнала k_S и контрастности сигнала k_C , а также соотношение сигнал-шум k_{SNR} (рис. 7).

На математическом уровне данные показатели могут быть выражены через получаемые на основе математического моделирования или экспериментального исследования значения:

$$\begin{cases} k_S = (I_{SN} - I_N) / I_S^{\max} \\ k_C = (I_{SN} - I_N) / I_{SN} \\ k_{SNR} = I_{SN} / \Delta I_{SN}^{\max} \end{cases}, \quad (3)$$

где I_{SN} — амплитуда ФЛ отклика при фокусировании луча на пите, I_N — амплитуда ФЛ отклика при фокусировании луча на ленте, ΔI_{SN}^{\max} — максимальное отклонение амплитуды ФЛ отклика при фокусировании луча на пите.

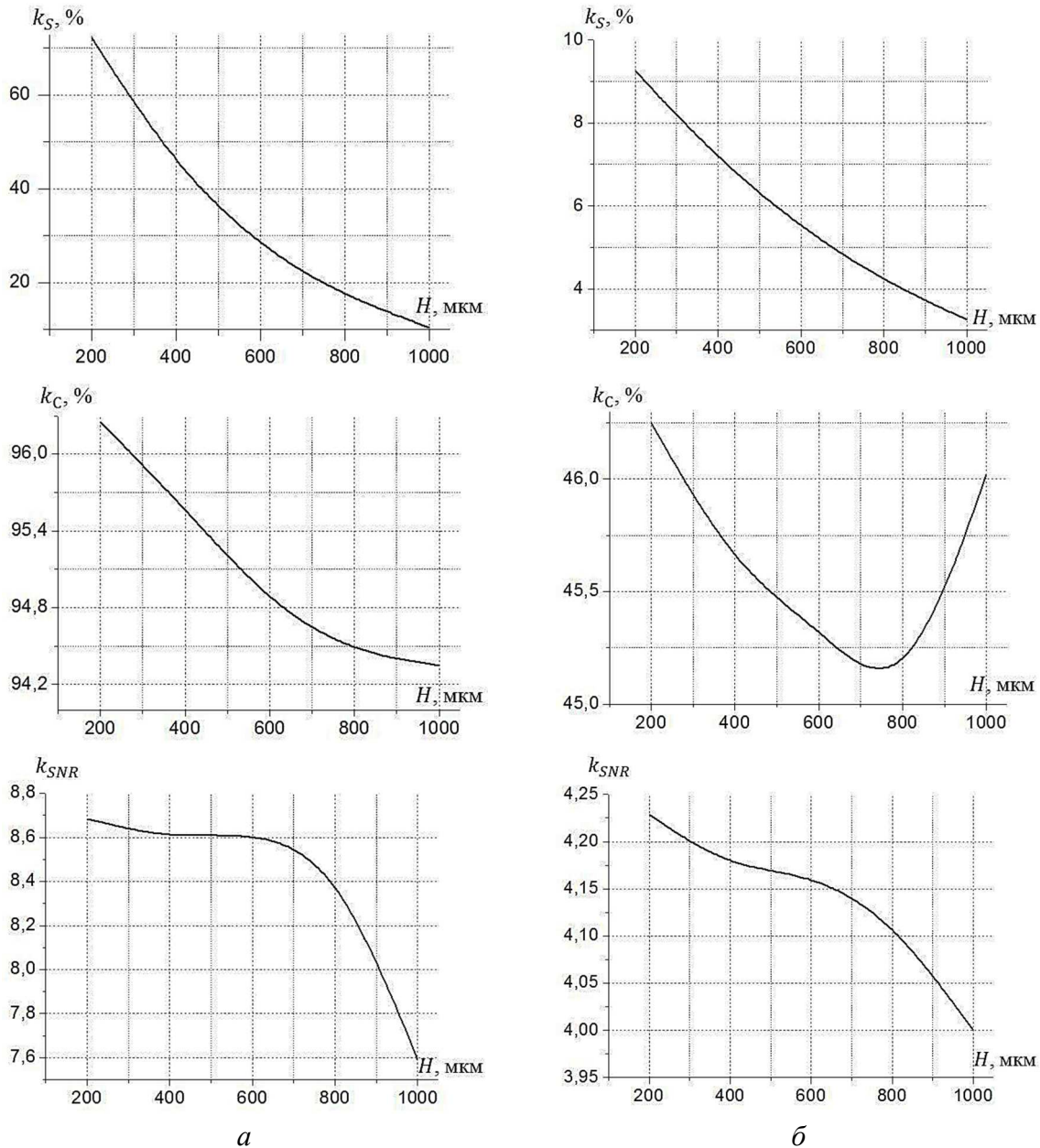


Рис. 7. Показатели надежности воспроизведения ФЛ сигнала:
 а – для одноуровневой записи; б – для восьмиуровневой записи

Аргументами целевых функций являются линейные размеры пита, толщина промежуточного слоя, коэффициент поглощения информационного элемента, коэффициент ФЛ отклика пита, коэффициент преломления структуры носителя, длина волны и числовая апертура оптической системы считывания. В результате машинного анализа удалось получить оптимальные значения для архитектуры РММ-носителя на основе системы считывания HD-DVD-привода. Локальные экстремумы целевых функций были получены для глубины пита $h_p = 340$ нм, диаметра пита $d_p = 160$ нм, минимальной длины ленда $s_l = 820$ нм и толщины промежуточного слоя $d_l = 340$ нм. Как показало моделирование (рис. 7, а) амплитуда полезного сигнала при фокусировке луча на последнем слое уменьшается в 10 раз. Но вместе с тем уменьшается и значение случайной погрешности, поэтому показатели контрастности и SNR хотя и ухудшаются, но остаются в пределах приемлемых.

Также была предложена возможность объединения методов многослойной и многоуровневой [10] оптической записи. Многоуровневая запись определяется через кодирование нескольких бит информации в одном информационном элементе, т.о., количество

уровней пропорционально увеличивает поверхностную плотность записи и скорость воспроизведения данных, но также соответственно уменьшает уровень полезного сигнала. Для РММ-носителей многоуровневое кодирование происходит за счет варьирования значения глубины рельефа либо концентрации люминофора в информационном элементе. Компьютерное моделирование восьмиуровневой многослойной ФЛ записи показало, что вместе с уменьшением минимального значения полезного сигнала, уменьшился и уровень шума, поэтому значение показателя контрастности и соотношения сигнал-шум уменьшились не у 8 раз, а в 2 раза (рис. 7, б), что свидетельствует о перспективности разработки многоуровневого РММ-носителя. Следует заметить, что высокая информационная емкость отдельного слоя позволит уменьшить общее количество слоев, и, таким образом, существенно улучшить показатели надежности носителя.

Выводы в соответствии со статьей. В результате проведенного исследования была разработана математическая модель, с помощью которой были определены оптимальные параметры структуры многослойного фотолюминесцентного носителя информации и оптической схемы устройства считывания через сведение данной задачи на уровень математической задачи поиска экстремумов целевых функций. Параметры элементов информационного слоя системы многослойной фотолюминесцентной записи были определены в соответствии с показателями уровня полезного сигнала и контрастности и соотношение сигнал-шум. Рассмотрена возможность объединения методов многослойной и многоуровневой оптической записи, показана возможность восьмиуровневого кодирования данных с сохранением показателей надежности считывания информации в допустимых пределах.

Список использованных источников

1. Надшільний оптичний запис інформації / відп. ред. О. Г. Додонов. Київ, 2009. 282 с.
2. Petrov V. V., Zichun L., Kryuchyn A. A., Shanoylo S. M., Fu M., Beliak Ie. V., Manko D. Yu., Lapchuk A. S., Morozov E. M. Long-term storage of digital information. Kyiv: Akademperiodyka, 2018. 148 p.
3. Petrov V. V., Kryuchyn A. A., Beliak Ie. V., Lapchuk A. S. Multi photon microscopy and optical recording. Kyiv: Akademperiodyka, 2016.
4. Kallepalli D. L., Alshehri A. M., Marquez D. T., Andrzejewski, L., Scaiano, J. C., Bhardwaj R. Ultra-high density optical data storage in common transparent plastics. *Scientific Reports*. 2016. № 6 (1). DOI: 10.1038/srep26163.
5. Riesen N., Pan X., Badek K., Ruan Y., Monro T. M., Zhao J., Riesen H. Towards rewritable multilevel optical data storage in single nanocrystals. *Optics Express*. 2018. № 26 (9). P. 12266. DOI: 10.1364/oe.26.012266
6. Kazansky P. G., Cerkauskaite A., Drevinskas R., Zhang J. Eternal 5D optical data storage in glass. *Optical Data Storage*. 4 March 2016. DOI: 10.1117/12.2240594.
7. Tanaka Y., Ogata T., Imagawa S. Decoupling direct tracking control system for super-multilayer optical disk. *Optical Data Storage*. 2014. DOI: 10.1117/12.2064244.
8. Roden J. A., Gedney S. D. Convolution PML (CPML): An efficient FDTD implementation of the CFS-PML for arbitrary media. *Microwave and Optical Technology Letters*. 2000. № 27. P. 334–339.
9. Rylander T., Bondeson A. Stable FDTD-FEM hybrid method for Maxwell's equations. *Computer Physics Communications*. 2000. № 125. P. 75–82.
10. Kravets V. G. Multilevel high-capacity optical memory. *Journal of Optical Technology*. 2000. № 67 (12). P. 1054. DOI: 10.1364/jot.67.001054.
11. Kikukawa A., Mikami H., Ide T., Osawa K., Watanabe K. Read Data Transfer Rate Estimation on Optical Phase Multilevel Recording. *Nonlinear Optics*. 2011. DOI: 10.1364/isom_ods.2011.otuc2.

References

1. Dodonov, O. H. (Ed.) (2009). *Nadshchilnyi optychnyi zapys informatsii [Superficial optical recording of information]*. Kyiv [in Ukrainian].
2. Petrov, V. V., Zichun, L., Kryuchyn, A. A., Shanoylo, S. M., Fu, M., Beliak, Ie. V., Manko, D. Yu., Lapchuk, A. S., Morozov, E. M. (2018). *Long-term storage of digital information*. Kyiv: Akademperiodyka [in English].

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

3. Petrov, V. V., Kryuchyn, A. A., Beliak, Ie. V., Lapchuk, A. S. (2016). *Multi photon microscopy and optical recording*. Kyiv: Akadempriodyka [in English].
4. Kallepalli, D. L., Alshehri, A. M., Marquez, D. T., Andrzejewski, L., Scaiano, J. C., & Bhardwaj, R. (2016). Ultra-high density optical data storage in common transparent plastics. *Scientific Reports*, 6 (1). DOI: 10.1038/srep26163 [in English].
5. Riesen, N., Pan, X., Badek, K., Ruan, Y., Monro, T. M., Zhao, J., Riesen, H. (2018). Towards rewritable multilevel optical data storage in single nanocrystals. *Optics Express*, 26(9), 12266. DOI: 10.1364/oe.26.012266 [in English].
6. Kazansky, P. G., Cerkauskaite, A., Drevinskas, R., & Zhang, J. (2016). Eternal 5D optical data storage in glass. *Optical Data Storage*. DOI:10.1117/12.2240594 [in English].
7. Tanaka, Y., Ogata, T., & Imagawa, S. (2014). Decoupling direct tracking control system for super-multilayer optical disk. *Optical Data Storage*. DOI:10.1117/12.2064244 [in English].
8. Roden, J. A., Gedney, S. D. (2000). Convolution PML (CPML): An efficient FDTD implementation of the CFS-PML for arbitrary media. *Microwave and Optical Technology Letters*, 27, 334–339 [in English].
9. Rylander, T., Bondeson A. (2000). Stable FDTD-FEM hybrid method for Maxwell's equations. *Computer Physics Communications*, 125, 75–82 [in English].
10. Kravets, V. G. (2000). Multilevel high-capacity optical memory. *Journal of Optical Technology*, 67 (12), 1054. DOI: 10.1364/jot.67.001054 [in English].
11. Kikukawa, A., Mikami, H., Ide, T., Osawa, K., & Watanabe, K. (2011). Read Data Transfer Rate Estimation on Optical Phase Multilevel Recording. *Nonlinear Optics*. DOI: 10.1364/isom_ods.2011.otuc2 [in English].

UDC 004.085

*Pavlo Anikin, Ievgen Beliak***ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF MULTI-LEVEL DATA CODING FOR MULTILAYER PHOTOLUMINESCENT INFORMATION RECORDING**

Urgency of the research. The method of digital recording of information, which is carried out through the coding of information elements in the form of microrelief structures with the subsequent contactless reading of information by a laser beam, is considered as the most promising approach in organizing long-term data storage systems.

Target setting. However, the data capacity and data reading speeds of modern optical media do not meet the requirements in the field of digital recording. The reason for the low density of digital optical recordings is the diffraction limit, which limits the resolution of optical systems.

Actual scientific researches and issues analysis. Research in this area shows the priority of innovative developments related to volumetric optical recording, in particular multi-layer photoluminescent recording, over complex solutions that allow increasing the surface recording density and include the use of complex subdiffraction optical systems.

Uninvestigated parts of general matters defining. The developers of storage devices of this type indicate the characteristic problems of multilayer photoluminescent recording: low data reading speed and low readout signal level.

The research objective. In this paper, a technique was proposed for volumetric optical information recording in multilayer, optically homogeneous media with photoluminescent information elements of multilevel coding.

The statement of basic materials. To determine the optimal parameters of this storage device and optical information recording system, a mathematical model of the photoluminescent recording process was developed.

Conclusions. The task of finding the optimal configuration of the optical system was solved by finding the extrema of the objective functions.

Keywords: optical recording of information; long-term data storage systems; multi-level coding; photoluminescent multilayer information carrier; read signal; spurious signal; objective function; extremum function.

Fig.: 7. References: 11.

Анікін Павел Сергеевич – соискатель ученой степени, Запорожский национальный технический университет (ул. Жуковского, 64, г. Запорожье, 69063, Украина).

Anikin Pavlo – Degree Applicant, Zaporizhzhia National Technical University (64 Zhukovskogo Str., 69063 Zaporizhzhya, Ukraine).

E-mail: 3456200698@qq.com

Беляк Евгений Вячеславович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем регистрации информации НАН Украины (ул. М. Шпака, 2, г. Киев, 03113, Украина).

Beliak Ievgen – PhD in Technical Sciences, senior Researcher, Institute for Information Recording of the National Academy of Sciences of Ukraine (2 M. Shpaka Str., 03113 Kyiv, Ukraine).

E-mail: beliak1312@gmail.com

Scopus Author ID: 55101211700

УДК 681.5

DOI: 10.25140/2411-5363-2019-1(15)-172-180

Олексій Жученко

УПРАВЛІННЯ ДИНАМІЧНИМИ ОБ'ЄКТАМИ З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОГНОЗУЮЧИХ МОДЕЛЕЙ

Актуальність теми дослідження. Одним із сучасних формалізованих підходів до аналізу і синтезу систем керування, що базуються на математичних методах оптимізації, є теорія управління динамічними об'єктами з використанням прогнозуючих моделей.

Постановка проблеми. Існує проблема управляти багатовимірними і багатозв'язними об'єктами зі складною структурою, що включає нелінійність, оптимізувати процеси в режимі реального часу в рамках обмежень на керуючі й керовані змінні, враховувати невизначеності об'єктів і збурень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За останні роки MPC-керуванню була присвячена значна кількість наукових досліджень. Питання робастної стійкості та збіжності алгоритмів керування MPC-систем розглядалися у багатьох робітах. Крім того, досліджувалися гібридні системи, які складаються як із неперервних, так і дискретних елементів.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Незважаючи на численні дослідження методу керування з прогнозуючою моделлю для різних об'єктів і умов функціонування, існує проблема використання даного методу для об'єктів з розподіленими параметрами, пов'язана із складністю математичного опису таких об'єктів.

Постановка завдання. Існує проблема використання даного методу для об'єктів з розподіленими параметрами, пов'язана із складністю математичного опису таких об'єктів.

Виклад основного матеріалу. Синтезовано систему керування з прогнозуючою моделлю для об'єктів із розподіленими параметрами на основі спрощеної математичної моделі останніх.

Висновки відповідно до статті. MPC – керування показало себе як ефективний інструмент для керування об'єктами з розподіленими параметрами, які математично описуються диференціальними рівняннями в частинних похідних. Застосування MPC – керування виглядає більш пріоритетним і щодо оптимального ЛК – керування у зв'язку з тим, що коригування керування здійснюється на кожному кроці.

Ключові слова: керування з прогнозуючою моделлю; електрокальцинатор; спрощена модель.

Рис.: 2. Бібл.: 18.

Актуальність теми дослідження. У сьогоdnішніх умовах постійного зростання вартості енергоносіїв та сировинних матеріалів для промислового виробництва завдання підвищення ефективності останнього набуває особливого значення. Одним із найбільш ефективних засобів вирішення цього завдання є впровадження сучасних комп'ютерних систем керування, які здатні забезпечити функціонування окремих технологічних процесів і промислового виробництва загалом в оптимальних режимах.

Сучасні комп'ютерні системи керування здебільшого будуються на основі математичних моделей керованих процесів. Практично всі реальні об'єкти керування характеризуються певною просторовою протяжністю та, як наслідок цього, не тільки залежністю керованих величин від часу, але і їх розподіленістю в просторовій області, яку займає об'єкт [1-4]. Тому має йтися про системи з розподіленими параметрами (СРП), для яких зміна керованих величин як у часі, так і у просторі математично описується диференціальними рівняннями в частинних похідних, інтегральними, інтегро-диференціальними рівняннями або системами рівнянь іншої природи.

Однак навіть для найбільш простих об'єктів системи з розподіленими параметрами описуються точними математичними моделями достатньо складного виду. При цьому типовим наслідком моделювання поведінки СРП диференціальними рівняннями в частинних похідних є трансцендентний характер залежності відповідних передатних функцій від комплексної змінної або опис цієї залежності у вигляді нескінченних рядів [1; 3; 5] навіть відносно зосереджених вхідних діянь, що суттєво ускладнює їх аналіз та використання при синтезі систем керування.

У більш складних випадках, наприклад, для просторово багатовимірних об'єктів зі складною формою границі області зміни просторових координат або в разі необхідності враховувати суттєві нелінійні ефекти, зазвичай, взагалі не вдається отримати аналітичний розв'язок рівнянь об'єкта [3].

Названі вище обставини призвели до поширення на практиці спрощених математичних моделей СРП, які описують їхню поведінку з потрібною точністю.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Одним із сучасних формалізованих підходів до аналізу і синтезу систем керування, що базуються на математичних методах оптимізації, є теорія управління динамічними об'єктами з використанням прогнозуючих моделей - Model Predictive Control (MPC) [6-8].

Цей підхід почав розвиватися для управління процесами й устаткуванням у нафтохімічному та енергетичному виробництві, для яких застосування традиційних методів синтезу було дуже незручним у зв'язку з винятковою складністю їх математичних моделей.

Нині сфера практичного застосування MPC-методів істотно розширилася, охоплюючи різноманітні технологічні процеси в хімічній і будівельній індустрії, легкій та харчовій промисловості, в аерокосмічних дослідженнях, у сучасних системах енергетики.

Основною перевагою MPC-підходу, що визначає його успішне використання в практиці побудови та експлуатації систем керування, є відносна простота базової схеми формування зворотного зв'язку, що поєднується з високими адаптивними властивостями. Остання обставина дозволяє управляти багатовимірними й багатозв'язними об'єктами зі складною структурою, що включає нелінійність, оптимізувати процеси в режимі реального часу в рамках обмежень на керуючі і керовані змінні, враховувати невизначеності об'єктів і збурень. Крім того, метод керування з прогнозуючою моделлю надає можливість враховувати транспортне запізнювання, зміни критеріїв якості в ході процесу і відмови датчиків системи вимірювання [9; 10].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У наш час розроблено багато методів побудови спрощених математичних моделей СРП [4; 11-16]. Усі вони можуть бути умовно поділені на дві основні групи згідно з «предметом апроксимації» [3].

Перша група утворюється різними способами спрощеного представлення самих вихідних диференціальних рівнянь об'єкта, наступний розв'язок яких відомими методами дозволяє отримати задовільні за точністю у визначених конкретних умовах опису властивостей СРП у порівняно простому вигляді.

Методи другої групи ґрунтуються на наближеному представленні (переважно в типовій для систем із зосередженими параметрами (СЗП) формі відповідних передатних функцій) точних розв'язків рівнянь у частинних похідних, які моделюють поведінку СРП.

Можливе послідовне застосування до тієї самої СРП різних методів апроксимації, що дозволяють, наприклад, спочатку перейти до спрощеного, що допускає точний аналітичний розв'язок, рівнянню об'єкта, для якого потім знайти дробово-раціональне наближення його передатної функції, що визначає результуюче наближення опису вихідної моделі об'єкта у вигляді типових моделей СЗП.

За останні роки MPC-керуванню була присвячена значна кількість досліджень. Питання робастної стійкості та збіжності алгоритмів керування MPC-систем розглядалися у роботах [1-5]. Гібридні системи, які складаються як із неперервних, так і дискретних елементів, досліджувались у працях [11-13]. Методи оптимізації, що використовуються в MPC-системах керування, розглядалися в статтях [14-16].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Незважаючи на численні дослідження методу керування з прогнозуючою моделлю для різних об'єктів і умов функціонування, існує проблема використання цього методу для об'єктів із розподіленими параметрами, пов'язана із складністю математичного опису таких об'єктів.

Постановка завдання. Метою цієї статті є синтез системи керування з прогнозуючою моделлю для об'єктів із розподіленими параметрами на основі спрощеної математичної моделі останніх.

Синтез системи керування

У роботі [17] запропонований метод спрощення математичних моделей об'єктів з розподіленими параметрами на основі методу Фур'є розділення змінних. Згідно з цим методом спрощена математична модель об'єктів з розподіленими параметрами може бути представлена у просторі станів таким чином

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) \\ \mathbf{W}\hat{\mathbf{T}}(k) &= \mathbf{C}_T\mathbf{x}(k) \\ \hat{\mathbf{a}}(k) &= \mathbf{C}_a\mathbf{x}(k) \end{aligned} \quad (1)$$

У цій моделі $\mathbf{x}(k) \in R^{n_x}$ – вектор стану спрощеної моделі, $\mathbf{u}(k) \in R^{n_u}$ – вектор керувань, $\hat{\mathbf{a}}(k) \in R^n$ – вектор коефіцієнтів Фур'є, який використовується для апроксимації вектора температур $\mathbf{T}(k) \in R^N$ згідно з виразом:

$$\mathbf{W}\hat{\mathbf{T}}(k) = \Phi_n \hat{\mathbf{a}}(k) = \Phi_n \mathbf{C}_a \mathbf{x}(k) = \mathbf{C}_T \mathbf{x}(k) \quad (2)$$

де

$$\mathbf{W}\hat{\mathbf{T}}(k) = \Phi_n \hat{\mathbf{a}}(k) = \Phi_n \mathbf{C}_a \mathbf{x}(k) = \mathbf{C}_T \mathbf{x}(k).$$

Тут $\hat{\mathbf{T}}(k)$ – оцінка $\mathbf{T}(k)$, \mathbf{W} – вагова матриця та $\Phi_n \in R^{n_x \times n_x}$ – матриця базисних векторів. Матриці $\mathbf{A}(k) \in R^{n_x \times n_x}$, $\mathbf{B} \in R^{n_x \times n_u}$, $\mathbf{C}_T \in R^{N \times n_x}$, $\mathbf{C}_a \in R^{n \times n_x}$, $\mathbf{C}_y \in R^{n_y \times n_x}$ – матриці параметрів моделі.

Цілком ймовірно, що не всі температури, які входять до моделі (1), однаково важливі для організації керування технологічним процесом, чим і пояснюється використання вагової матриці \mathbf{W} .

Розрахунок керувань у MPC-системах здійснюється на кожному кроці, тому доцільно перейти до математичної моделі, яка б використовувала прирощення $\Delta\mathbf{u}(k)$. Для цього перепишемо (2) у вигляді:

$$\begin{aligned} \mathbf{z}(k+1) &= \mathbf{A}_z \mathbf{z}(k) + \mathbf{B}_z \Delta\mathbf{u}(k), \\ \hat{\mathbf{a}}(k) &= \mathbf{C}_{a,z} \mathbf{z}(k), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{де } \mathbf{z}(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{z}(k-1) \\ \mathbf{z}(k) - \mathbf{z}(k-1) \end{bmatrix}, \quad \Delta\mathbf{u}(k) = \mathbf{u}(k) - \mathbf{u}(k-1), \quad \mathbf{A}_z = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{n_x} & \mathbf{I}_{n_x} \\ 0 & \mathbf{A} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_z = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{B} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_{a,z} = [\mathbf{C}_a \quad \mathbf{C}_a].$$

Сформулюємо задачу керування. Нехай будуть відомими нижня $\Delta\mathbf{u}_{\min}$ та верхня $\Delta\mathbf{u}_{\max}$ границі сигналу зміни керування $\Delta\mathbf{u}(k)$, а також нижня \mathbf{u}_{\min} та верхня \mathbf{u}_{\max} границі сигналу керування $\mathbf{u}(k)$, крім того відомий вектор заданих температур $\mathbf{T}_{зад}(k)$. Треба для кожного кроку керування знайти керуючі сигнали $\mathbf{u}(k), \mathbf{u}(k+1), \dots, \mathbf{u}(k+N_K)$ такі, що оптимізують критерій оптимальності:

$$J(\mathbf{x}_0, \mathbf{T}_{зад}, \mathbf{u}) = \sum_{i=1}^{N_{II}} \left\| \mathbf{T}(k+i) - \mathbf{T}_{зад}(k+i) \right\|_{\Pi_T}^2 + \sum_{i=0}^{N_K-1} \left\| \Delta\mathbf{u}(k+i) \right\|_{\Pi_u}^2 \quad (4)$$

з урахуванням обмежень:

$$\begin{aligned} \Delta\mathbf{u}_{\min} &\leq \Delta\mathbf{u}(k) \leq \Delta\mathbf{u}_{\max} \\ \mathbf{u}_{\min} &\leq \mathbf{u}(k+j) \leq \mathbf{u}_{\max} \\ \text{для } j &= 0, 2, \dots, N_K \end{aligned} \quad (5)$$

де \mathbf{x}_0 – початковий вектор стану, N_{II} – інтервал прогнозування, N_K – інтервал керування.

У функції ціни (4) замінимо $\mathbf{T}_{зад}(k)$ та $\mathbf{T}(k)$ на їхні оцінки. Тоді

$$\begin{aligned}
 J(\mathbf{x}_0, \mathbf{T}_{3a\partial}, \mathbf{u}) &= \sum_{i=1}^{N_{II}} \left\| \hat{\mathbf{T}}_{3a\partial}(\mathbf{k}+i) - \hat{\mathbf{T}}(\mathbf{k}+i) \right\|_{\mathbf{Q}}^2 + \sum_{i=0}^{N_K-1} \left\| \Delta \mathbf{u}(\mathbf{k}+i) \right\|_{\mathbf{R}}^2 = \\
 &= \sum_{i=1}^{N_{II}} \left\| \mathbf{r}(\mathbf{k}+i) - \hat{\mathbf{a}}(\mathbf{k}+i) \right\|_{\mathbf{Q}}^2 + \sum_{i=0}^{N_K-1} \left\| \Delta \mathbf{u}(\mathbf{k}+i) \right\|_{\mathbf{R}}^2
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

де матриця \mathbf{Q} :

$$\mathbf{Q} = \mathbf{W}^T \mathbf{W}
 \tag{7}$$

Обмеження (5) запишемо у вигляді:

$$\mathbf{A}_I \Delta \tilde{\mathbf{u}}(\mathbf{k}) \leq \mathbf{b}_I$$

$$\text{де } \mathbf{A}_I = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{N_K n_u} \\ -\mathbf{I}_{N_K n_u} \\ E_1 \\ -E_1 \end{bmatrix}, \mathbf{b}_I = \begin{bmatrix} \Delta \tilde{\mathbf{u}}_{\max} \\ \Delta \tilde{\mathbf{u}}_{\min} \\ \tilde{\mathbf{u}}_{\max} - \mathbf{E}_2 \mathbf{u}(\mathbf{k}-1) \\ -\tilde{\mathbf{u}}_{\min} + \mathbf{E}_2 \mathbf{u}(\mathbf{k}-1) \end{bmatrix}, \mathbf{E}_1 = \begin{bmatrix} I_{n_u} & 0 & \dots & 0 \\ I_{n_u} & I_{n_u} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ I_{n_u} & I_{n_u} & \dots & I_{n_u} \end{bmatrix}, \mathbf{E}_2 = \begin{bmatrix} I_{n_u} \\ I_{n_u} \\ \vdots \\ I_{n_u} \end{bmatrix}.$$

Розраховуючи прогнозовані значення оцінок коефіцієнтів Фур'є на N_{II} кроків вперед, та знаючи $r(\mathbf{k}+1), r(\mathbf{k}+2), \dots, r(\mathbf{k}+N_{II})$, а також з урахуванням вектора зміни керувань $\Delta \mathbf{u}(\mathbf{k})$ та визначаючи поточний вектор прирощень змінних стану, сформуємо вектор

$$\bar{\mathbf{a}}(\mathbf{k}+1) = \begin{bmatrix} a(\mathbf{k}+1) \\ a(\mathbf{k}+2) \\ \vdots \\ a(\mathbf{k}+N_p) \end{bmatrix} = \bar{\mathbf{C}}_a \mathbf{z}(\mathbf{k}) + \bar{\mathbf{D}}_a \Delta \bar{\mathbf{u}}(\mathbf{k})
 \tag{8}$$

$$\text{де } \bar{\mathbf{C}}_a = \begin{bmatrix} C_{a,z} \mathbf{A} \\ C_{a,z} \mathbf{A}_z^2 \\ \vdots \\ C_{a,z} \mathbf{A}_z^{N_p} \end{bmatrix}, \Delta \mathbf{u}(\mathbf{k}) = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{u}(\mathbf{k}) \\ \Delta \mathbf{u}(\mathbf{k}+1) \\ \vdots \\ \Delta \mathbf{u}(\mathbf{k}+N_K-1) \end{bmatrix},$$

$$\bar{\mathbf{D}}_a = \begin{bmatrix} C_{a,z} \mathbf{B}_z & 0 & \dots & 0 \\ C_{a,z} \mathbf{A}_z \mathbf{B}_z & C_{a,z} \mathbf{B}_z & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ C_{a,z} \mathbf{A}_z^{N_K-1} \mathbf{B}_z & C_{a,z} \mathbf{A}_z^{N_K-2} \mathbf{B}_z & \dots & C_{a,z} \mathbf{B}_z \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{a,z} \mathbf{A}_z^{N_{II}-1} \mathbf{B}_z & C_{a,z} \mathbf{A}_z^{N_{II}-2} \mathbf{B}_z & \dots & C_{a,z} \mathbf{A}_z^{N_{II}-N_K} \mathbf{B}_z \end{bmatrix}.$$

Підставимо (8) у функцію ціни (7)

$$\begin{aligned}
 J(\mathbf{x}_0, \mathbf{T}_{3a\partial}, \Delta \mathbf{u}) &= [\bar{\mathbf{r}}(\mathbf{k}+1) - \bar{\mathbf{a}}(\mathbf{k}+1)]^T [\bar{\mathbf{r}}(\mathbf{k}+1) - \bar{\mathbf{a}}(\mathbf{k}+1)] + \\
 &+ \Delta \bar{\mathbf{u}}^T(\mathbf{k}) \bar{\mathbf{R}} \Delta \bar{\mathbf{u}}(\mathbf{k})
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

$$= [\bar{\mathbf{r}}(k+1) - \bar{\mathbf{C}}_a \mathbf{z}(k) - \bar{\mathbf{D}}_a \bar{\mathbf{u}}(k)]^T [\bar{\mathbf{r}}(k+1) - \bar{\mathbf{C}}_a \mathbf{z}(k) - \bar{\mathbf{D}}_a \bar{\mathbf{u}}(k)] + \Delta \bar{\mathbf{u}}^T(k) \bar{\mathbf{R}} \Delta \bar{\mathbf{u}}(k) \quad (10)$$

$$= \Delta \bar{\mathbf{u}}^T(k) (\mathbf{R} + \bar{\mathbf{D}}_a^T \bar{\mathbf{D}}_a) \Delta \bar{\mathbf{u}}(k) - 2 [\bar{\mathbf{r}}(k+1) - \bar{\mathbf{C}}_a \mathbf{z}(k)]^T \bar{\mathbf{D}}_a \Delta \bar{\mathbf{u}}(k) \quad (11)$$

$$+ [\bar{\mathbf{r}}(k+1) - \bar{\mathbf{C}}_a \mathbf{z}(k)]^T [\bar{\mathbf{r}}(k+1) - \bar{\mathbf{C}}_a \mathbf{z}(k)]. \quad (12)$$

Враховуючи, що останній доданок не залежить від $\Delta u(k)$, можна замість функції ціни (6) використовувати функцію

$$J'(\mathbf{z}(k), \mathbf{T}_{зад}(k), \Delta \bar{\mathbf{u}}(k)) = \Delta \bar{\mathbf{u}}^T(k) \mathbf{H} \Delta \bar{\mathbf{u}}(k) + \mathbf{c}^T \Delta \bar{\mathbf{u}}(k), \quad (13)$$

де $\mathbf{H} = \mathbf{R} + \bar{\mathbf{D}}_a^T \bar{\mathbf{D}}_a$, $\mathbf{c}^T = [\bar{\mathbf{r}}(k+1) - \bar{\mathbf{C}}_a \mathbf{z}(k)]^T \bar{\mathbf{D}}_a$.

Отже, задача керування, яка має розв'язуватись на кожному кроці керування, тепер може бути сформульована таким чином: відомі вектор заданих температур $\mathbf{T}_{зад}(k)$ та початковий вектор прирощень змінних стану $\mathbf{z}(k)$. Треба знайти вектор змін керувань $\Delta \bar{\mathbf{u}}(k)$ такий, що мінімізує (13) при обмеженнях (5).

Сформульована задача керування є оптимізаційною задачею квадратичного програмування. Для її розв'язання був використаний стандартний програмний пакет [18].

Імітаційне моделювання

Як об'єкт імітаційного моделювання було досліджено електрокальцинатор у процесі термічної обробки вуглецевої сировини. Розташування контрольних точок представлено на рис. 1.

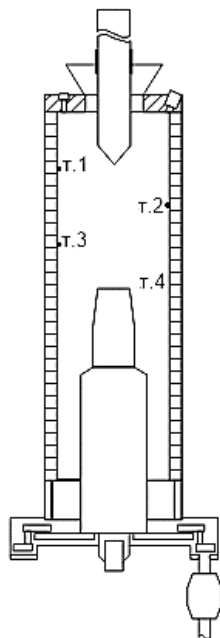


Рис. 1. Схема розміщення експериментальних точок у процесі термічної обробки вуглецевої сировини в електрокальцинаторі

Таке розміщення експериментальних точок пояснюється відсутністю можливості встановлення вимірювальних пристроїв безпосередньо в робочий простір електрокальцинатору.

На рис. 2 представлені результати імітаційного моделювання для 4 точок, які були вибрані як об'єкти експериментальних досліджень.

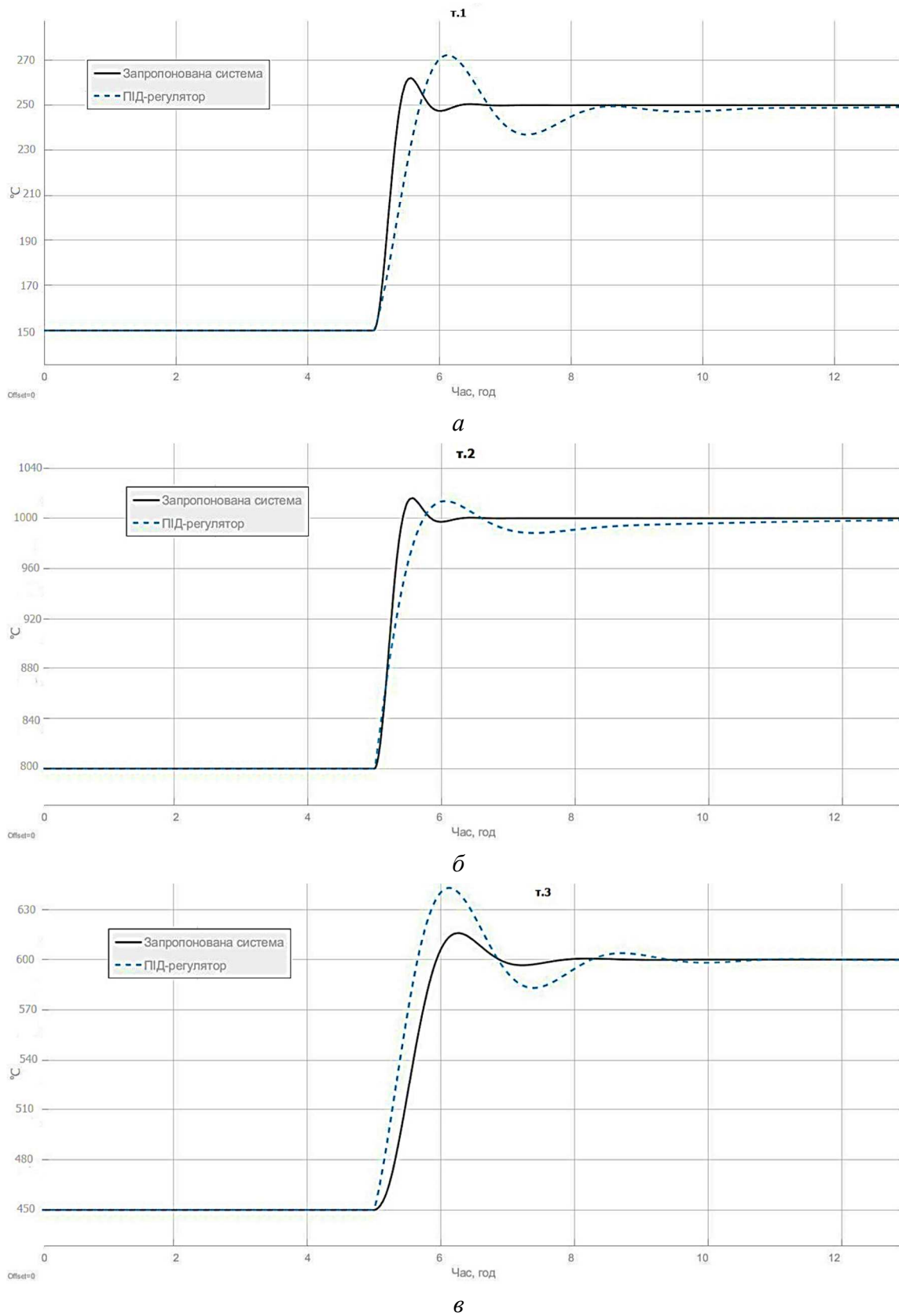


Рис. 2. Результати імітаційного моделювання для точки:
а – т. 1; б – т. 2; в – т. 3; г – т. 4

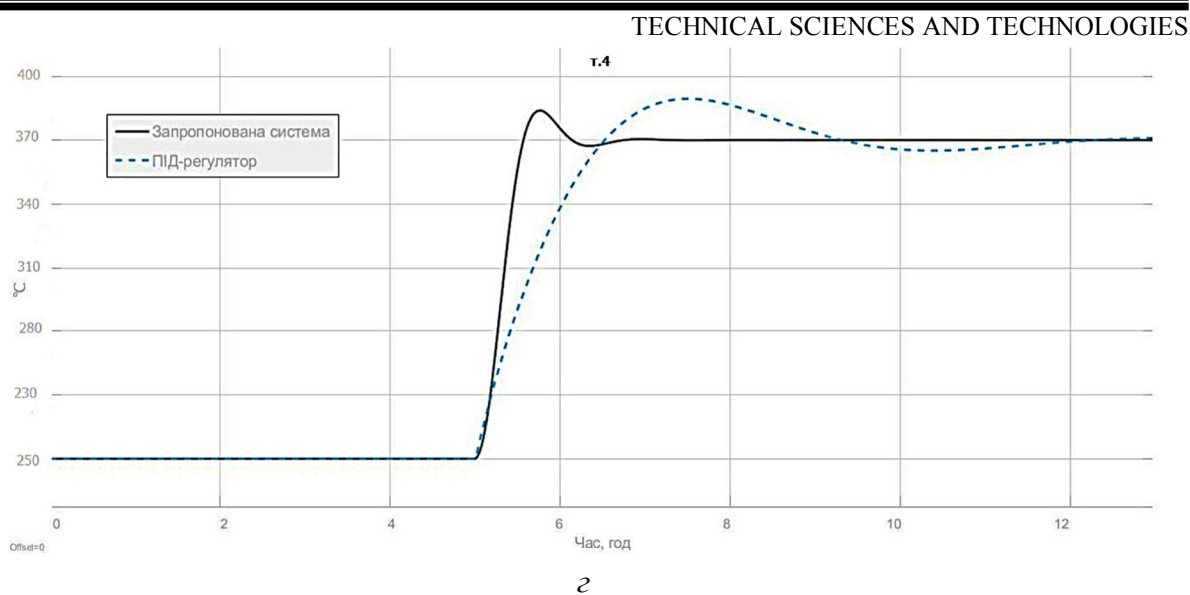


Рис. 2. Аркуш 2

Як видно з представлених на рис. 2 результатів, у момент часу $t = 5$ год було збільшене завдання по температурі ступінчастим чином. При цьому MPC – керування, побудоване на основі спрощеної математичної моделі електрокальцинатора, демонструє достатньо високу ефективність у порівнянні з класичним ПІД-регулятором.

Висновки відповідно до статті.

Як свідчать отримані результати досліджень, MPC – керування показало себе як ефективний інструмент для керування об'єктами з розподіленими параметрами, які математично описуються диференціальними рівняннями в частинних похідних. При цьому в системі керування реального часу використовується спрощена математична модель об'єкта.

Проведене дослідження продемонструвало перевагу MPC – керування в порівнянні із системою з класичним ПІД – регулятором.

Застосування MPC – керування виглядає більш пріоритетним і щодо оптимального ЛК – керування у зв'язку з тим, що коригування керування здійснюється на кожному кроці.

Подальші дослідження ефективності MPC – керування для об'єктів із розподіленими параметрами з використанням спрощеної математичної моделі останніх пов'язане з експериментальними випробуваннями цього методу для технологічних об'єктів різної природи та динамічних характеристик.

Список використаних джерел

1. Grüne, Lars (2012). NMPC without terminal constraints. In Proceedings of *IFAC conference on nonlinear model predictive control 2012*, August.
2. Mayne, D. Q. (2013). An apologia for stabilising conditions in model predictive control. *International Journal of Control*, 86(11), 2090–2095
3. Rawlings, James B., & Mayne, David Q. (2009). *Model predictive control: theory and design*. Nob Hill, Madison, Wisconsin, August.
4. Yu, Shuyou, Reble, Marcus, Chen, Hong, & Allgöwer, Frank (2011). Inherent robustness properties of quasi-infinite horizon MPC. In Proceedings of the *18th IFAC world congress*, Milano, Italy, August, September.
5. Fagiano, Lorenzo, & Teel, Andrew R. (2013). Generalized terminal state constraint for model predictive control. *Automatica*, 49(9), 2622–2631
6. Tobias, Geyer (Nov. 2016). *Model predictive control of high power converters and industrial drives*. Wiley, London.
7. Michael, Nikolaou (2001). Model predictive controllers: A critical synthesis of theory and industrial needs. *Advances in Chemical Engineering, Academic Press*, 26, 131–204.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

8. García, M. R., Vilas, C., Santos, L. O., Alonso, A. A. (2012). A Robust Multi-Model Predictive Controller for Distributed Parameter Systems. *Journal of Process Control*, 22 (1), 60–71.
9. Hedengren, J. D., Asgharzadeh Shishavan, R., Powell, K. M., Edgar, T. F. (2014). Nonlinear modeling, estimation and predictive control in APMonitor. *Computers & Chemical Engineering*, 70 (5), 133–148.
10. Findeisen, Rolf, Allgower, Frank (2001). An introduction to nonlinear model predictive control. In C. W. Scherer and J.M. Schumacher (Eds.), *Summerschool on «The Impact of Optimization in Control»* (pp. 3.1–3.45). Dutch Institute of Systems and Control.
11. Mayne, D. Q., Rawlings, J. B., Rao, C. V., & Scokaert, P. O. M. (2000). Constrained model predictive control: stability and optimality. *Automatica*, 36, 789–814.
12. Camacho, E. F., Ramirez, D. R., Limon, D., Muñoz de la Peña, D., & Alamo, T. (2010). Model predictive control techniques for hybrid systems. *Annual Reviews in Control*, 34 (1), 21–31.
13. Müller, Matthias A., & Allgöwer, Frank (2012). Improving performance in model predictive control: switching cost functionals under average dwell-time. *Automatica*, 48(2), 402–409.
14. Richter, S., Morari, M., & Jones, C. N. (2011). Towards computational complexity certification for constrained MPC based on Lagrange relaxation and the fast gradient method. In Proceedings of the 50th IEEE conference on decision and control and the European control conference, December.
15. Korda, Milan, & Jones, Colin (2014). Certification of fixed computation time firstorder optimization-based controllers for a class on nonlinear dynamics. In Proceedings of the 2014 American control conference.
16. Biegler, Lorenz T. (2013). A survey on sensitivity-based nonlinear model predictive control. In Proceedings of the 10th IFAC international symposium on dynamics and control of process systems (pp. 499–510). Mumbai, India: IFAC, December.
17. Жученко О. А., Цапар В. С. Метод спрощення математичних моделей об'єктів керування із розподіленими параметрами. *Автоматизація технологічних і бізнес-процесів*. 2015. Т. 7, вип. 1. С. 15–25.
18. Cesar Lopez. MATLAB Optimization Techniques. *Apress*; 1st ed. edition (November 1, 2014). 292 p.

References

1. Grüne, Lars (2012). NMPC without terminal constraints. In Proceedings of *IFAC conference on nonlinear model predictive control 2012*, August.
2. Mayne, D. Q. (2013). An apologia for stabilising conditions in model predictive control. *International Journal of Control*, 86(11), 2090–2095
3. Rawlings, James B., & Mayne, David Q. (2009). *Model predictive control: theory and design*. Nob Hill, Madison, Wisconsin, August.
4. Yu, Shuyou, Reble, Marcus, Chen, Hong, & Allgöwer, Frank (2011). Inherent robustness properties of quasi-infinite horizon MPC. In Proceedings of the 18th IFAC world congress, Milano, Italy, August, September.
5. Fagiano, Lorenzo, & Teel, Andrew R. (2013). Generalized terminal state constraint for model predictive control. *Automatica*, 49(9), 2622–2631
6. Tobias, Geyer (Nov. 2016). *Model predictive control of high power converters and industrial drives*. Wiley, London.
7. Michael, Nikolaou (2001). Model predictive controllers: A critical synthesis of theory and industrial needs. *Advances in Chemical Engineering, Academic Press*, 26, 131–204.
8. García, M. R., Vilas, C., Santos, L. O., Alonso, A. A. (2012). A Robust Multi-Model Predictive Controller for Distributed Parameter Systems. *Journal of Process Control*, 22 (1), 60–71.
9. Hedengren, J. D., Asgharzadeh Shishavan, R., Powell, K. M., Edgar, T. F. (2014). Nonlinear modeling, estimation and predictive control in APMonitor. *Computers & Chemical Engineering*, 70 (5), 133–148.
10. Findeisen, Rolf, Allgower, Frank (2001). An introduction to nonlinear model predictive control. In C. W. Scherer and J.M. Schumacher (Eds.), *Summerschool on «The Impact of Optimization in Control»* (pp. 3.1–3.45). Dutch Institute of Systems and Control.
11. Mayne, D. Q., Rawlings, J. B., Rao, C. V., & Scokaert, P. O. M. (2000). Constrained model predictive control: stability and optimality. *Automatica*, 36, 789–814.

12. Camacho, E. F., Ramirez, D. R., Limon, D., Muñoz de la Peña, D., & Alamo, T. (2010). Model predictive control techniques for hybrid systems. *Annual Reviews in Control*, 34 (1), 21–31.
13. Müller, Matthias A., & Allgöwer, Frank (2012). Improving performance in model predictive control: switching cost functionals under average dwell-time. *Automatica*, 48(2), 402–409.
14. Richter, S., Morari, M., & Jones, C. N. (2011). Towards computational complexity certification for constrained MPC based on Lagrange relaxation and the fast gradient method. In *Proceedings of the 50th IEEE conference on decision and control and the European control conference*, December.
15. Korda, Milan, & Jones, Colin (2014). Certification of fixed computation time firstorder optimization-based controllers for a class on nonlinear dynamics. In *Proceedings of the 2014 American control conference*.
16. Biegler, Lorenz T. (2013). A survey on sensitivity-based nonlinear model predictive control. In *Proceedings of the 10th IFAC interntaional symposium on dynamics and control of process systems* (pp. 499–510). Mumbai, India: IFAC, December.
17. Zhuchenko O. A., Tsapar V. S. (2015). Metod sproshchennia matematychnykh modelei obiektyv keruvannia iz rozpodilenykh parametramy [Method of simplification of mathematical models of control objects with distributed parameters]. *Avtomatyzatsiia tekhnolohichnykh i biznes-protsesiv – Automation of Technological and Business Processes*, 7, 1, 15–25 [in Russian].
18. Cesar Lopez. MATLAB Optimization Techniques. *Apress*; 1st ed. edition (November 1, 2014).

UDC 681.5

Oleksii Zhuchenko

CONTROL OF DYNAMIC OBJECTS WITH DISTRIBUTED PARAMETERS USING PREDICTIVE MODELS

Urgency of the research. One of the modern formalized approaches to the analysis and synthesis of control systems based on mathematical methods of optimization is the theory of control of dynamic objects using predictive models.

Target setting. There is a problem controled multidimensional and multifaceted objects with a complex structure that includes non-linearity, optimizing processes in real-time in the constraints on control and controled variables, taking into account uncertainty of objects and disturbances.

Actual scientific researches and issues analysis. In recent years, a considerable amount of scientific research has been devoted to the MPC. Questions of robust stability and convergence of algorithms for controlling MPC-systems were considered in a number of papers. In addition, hybrid systems, which consist of both continuous and discrete elements, were studied.

The research objective. There is a problem with using this method for objects with distributed parameters, due to the complexity of the mathematical description of such objects.

The statement of basic materials. A control system with a predictive model for objects with distributed parameters is synthesized based on a simplified mathematical model of the latter.

Conclusions. MPC - control has proved to be an effective tool for control objects with distributed parameters, mathematically described by differential equations in partial derivatives. The use of MPC - control seems to be more prioritized in relation to optimal control of the LC because control adjustments are carried out at each step.

Keywords: control with predictive model; electrocalculator; simplified model.

Fig.: 2. References: 18.

Жученко Олександр Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації хімічних виробництв, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна).

Zhuchenko Oleksii – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Chemical Production Automation, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (37 Pobedy Av., 03056 Kyiv, Ukraine).

E-mail: azhuch@ukr.net

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5611-6529>

ResearcherID: J-6369-2017

Scopus Author ID: 57190444874

РОЗДІЛ IV. ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 637.07

DOI: 10.25140/2411-5363-2019-1(15)-181-188

Наталія Буяльська, Олена Купчик, Наталя Денисова

ВИКОРИСТАННЯ СОРБЕНТІВ ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ У МОЛОЧНІЙ СИРОВИНІ

Актуальність теми дослідження. Одними з найсильніших за дією та найбільш поширених хімічних забруднювачів харчових продуктів, зокрема молочних, є важкі метали. На сьогодні є нагальна потреба у визначенні їх вмісту та пошуку шляхів зменшення ризиків, викликаних споживанням забрудненої продукції.

Постановка проблеми. Перерозподіл важких металів у ході технологічних процесів не завжди забезпечує отримання продуктів із безпечним рівнем токсичних металів, тому необхідним є підбір сорбентів та пошук оптимальних технологічних режимів детоксикації вихідної молочної сировини.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Виришенню наукових та практичних питань, пов'язаних із моніторингом важких металів у харчових продуктах та розробкою способів їх елімінації, присвячені роботи багатьох відомих учених та практиків.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. У літературних джерелах практично відсутні відомості про вміст важких металів у сухому молоці. У роботах, присвячених вибору сорбентів для детоксикації вихідної молочної сировини, не завжди враховано їхній вплив на вміст у молоці кальцію, білку, жиру тощо.

Постановка завдання. Мета роботи – визначити вміст важких металів у сухому молоці, проаналізувати шляхи їх надходження та на основі отриманих результатів розробити технологічні режими та способи детоксикації важких металів.

Виклад основного матеріалу. Наведені результати аналізу вмісту важких металів у сухому молоці. Запропоновані методи зниження концентрації Pb та Cd в молочної сировині з використанням сорбентів. Досліджений вплив сорбентів на якість сировини. Встановлено, що застосування поліфаму не впливає на органолептичні та основні фізико-хімічні показники молока. Визначений ступінь очистки молока-сировини від важких металів. Встановлені оптимальні умови процесу детоксикації поліфамом (температура, час експозиції сорбенту та його концентрація).

Висновки відповідно до статті. Проведені дослідження дозволяють використовувати молоко-сировину з підвищеним вмістом важких металів в подальшому виробництві молочних продуктів.

Ключові слова: забруднення харчових продуктів; важкі метали; сорбенти; детоксикація; вольтамперометричний аналіз.

Рис.: 1. Табл.: 6. Бібл.: 16.

Актуальність теми дослідження. У зв'язку з інтенсифікацією промисловості й сільськогосподарства на значних територіях спостерігається нагромадження в ґрунтах важких металів у високих концентраціях, які токсично діють на живі організми. З харчовими продуктами в організм людини надходить приблизно 70 важких металів. Меркурій, кадмій, плумбум, арсен, купрум, стронцій, цинк, ферум зараховані Комісією з Кодексу Аліментаріус до компонентів, вміст яких контролюється в разі міжнародної торгівлі харчовими продуктами [1].

Одними із найнебезпечніших токсикантів серед важких металів є сполуки плумбуму та кадмію, які мають загальнотоксичні, канцерогенні, тератогенні, ембріотоксичні властивості. Забруднення ґрунту Pb і Cd має незворотний характер, тому надходження їх навіть у незначних кількостях протягом тривалого часу призводить до накопичення в ґрунті та міграції в системі «ґрунт – рослина – рослинницька продукція – організм людини».

На жаль, світовий досвід показує, що вміст плумбуму в молоці постійно збільшується. Крім того, що він потрапляє в молоко корів, яких годують зеленими травами та сіном, що містять цей елемент, плумбум може потрапляти безпосередньо в молоко з повітря. Встановлено, що 50 % свинцю з повітря, що використовується при сушінні молока, переходить у сухий продукт. Високу токсичність, а також високу міграційну здатність у системі «ґрунт – вода – рослини» має також кадмій, що зумовлює ймовірність підвищеного надходження його в організм сільськогосподарських тварин і потрапляння в молоко [2; 3].

Металічні забруднення належать до пріоритетних, тому спостереження за ними є обов'язковими для всіх середовищ. Особливо актуально це для харчових продуктів, зокрема й молочних, які у світових ресурсах продовольчих товарів посідають вагоме місце.

Постановка проблеми. Молоко – повноцінний продукт харчування, незамінна сировина для молокопереробної галузі. Контроль молочної сировини лише за наявності важких металів, без визначення їх концентрації не захищає споживачів від небезпечної продукції. Встановлено, що в організм тварин із кормами потрапляє 99,8 % загальної кількості *Cu*, 99,8 % *Zn*, 99,9 % *Mn*, 99,6 % *Cd*, і 99,1 % *Pb* [2].

У багатьох країнах світу, і насамперед у США та Німеччині, створюються спеціалізовані науково-дослідні інститути та лабораторії, метою яких є вивчення якості молока у зв'язку з потраплянням у нього шкідливих небажаних компонентів із навколишнього середовища. Ведуться роботи з пошуку та створення методів і апаратів для видалення або дезактивації шкідливих речовин, що містяться в молоці. Для видалення ряду важких металів використовують іонообмінні та електродіалізні процеси. Використання таких пристроїв для видалення з молока шкідливих речовин, безумовно, необхідне в критичних ситуаціях, але широке застосування іонообмінників, електродіалізаторів навряд чи можна вважати виправданим з економічного погляду.

На жаль, у нашій країні таких спеціалізованих інститутів та лабораторій немає. Частими є випадки, коли заради кількісного збільшення виробництва молочних продуктів заводи приймають молоко практично будь-якої якості [3].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дослідження вчених багатьох країн (Р. Й. Кравців, І. І. Ковальчук, Р. С. Федорук, І. І. Пилипів, І. М. Трахтенберг, Л. О. Тарасенко та ін.) присвячені проблемі забруднення молока та молочних продуктів важкими металами. Рівень забруднення залежить від інтенсивності техногенного навантаження на сільськогосподарські угіддя, повноцінності годівлі та умов утримання тварин [2–9].

Перерозподіл важких металів у ході технологічних процесів не завжди забезпечує отримання продуктів із безпечним рівнем токсичних металів. Дослідження щодо використання сорбентів для детоксикації молочної сировини, проведені Г. М. Забегаловою, В. В. Морозовою та іншими ученими, були спрямовані на встановлення сорбційної ємності сорбентів карболону, полісорбу, порошку та гранул поліфепану й лише незначно стосувались питань впливу сорбенту на основні показники якості і хімічний склад молока. Деякими авторами сорбенти були використані для посилення споживчих властивостей уже готових продуктів. Оцінка тільки сорбції контамінантів є в таких умовах не зовсім об'єктивною тому, що можлива втрата деякої кількості хімічних речовин (насамперед білків і жиру), що акумулюють важкі метали. Оскільки технологічні властивості молока є важливою частиною оцінки придатності його до переробки в інші продукти й надалі визначають якість готових виробів, вивчення цих факторів є необхідним [10; 11].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. На сьогодні ні спеціалісти промисловості, ні споживачі не знають справжнього розподілу всіх шкідливих та небажаних речовин у продуктах, виготовлених на основі молочної сировини. Важливість суворого контролю вмісту важких металів та пошук оптимальних технологічних режимів детоксикації все більше зростає у зв'язку зі складною екологічною ситуацією в Україні.

У літературних джерелах практично немає інформації про вміст важких металів у сухому молоці. Аналіз розрахованих у попередніх роботах ризиків [12] доводить актуальність вдосконалення технології переробки молочної сировини для зниження концентрації важких металів. Корируючі дії, пов'язані зі зниженням ризику вживання забрудненої продукції, повинні бути спрямовані саме на зниження вмісту важких металів у вихідній сировині.

Мета статті – визначити вміст важких металів у сухому молоці, проаналізувати шляхи їх надходження та на основі отриманих результатів розробити технологічні ре-

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

жими та способи детоксикації важких металів з урахуванням впливу сорбентів на основні показники якості молока.

Виклад основного матеріалу. Вміст важких металів визначали в зразках сухого незбираного та знежиреного молока, що відповідало вимогам ДСТУ [13], та зразках незбираного молока. Незбиране коров'яче молоко було отримане від здорових тварин та за показниками якості відповідало вимогам ДСТУ 3662-97 [14] на заготівельне молоко. Відбирання проб проводили згідно з ДСТУ ISO 707:2002 [15]. Точкові проби відбирали пробовідбірниками (металева або пластмасова циліндрична трубка з внутрішнім діаметром 9 мм за всією довжиною) або спеціальною квартою з подовженою ручкою місткістю 0,50 або 0,25 дм³. Відібрані точкові проби зливали в посудину, перемішували, отримуючи таким чином об'єднану пробу об'ємом близько 1,0 дм³. Для проведення аналізу з об'єднаної проби після перемішування виділяли пробу об'ємом 0,5 дм³.

У процесі підготовки проб для аналізу за фізико-хімічними показниками молоко перемішували, перевертаючи посудину не менше трьох разів або переливаючи в іншу посудину та назад не менше двох разів, та підігрівали або охолоджували до температури (20 ± 2) °С. Перед дослідженням консервовану пробу та пробу з відстоєм шаром вершків нагрівали до температури (35 ± 5) °С на водяній бані температурою (48 ± 2) °С та охолоджували до температури (20 ± 2) °С.

Пробопідготовку харчових продуктів проводили з використанням двокамерної печі ПДП, що програмується. Метод засновувався на поєднанні мокрої мінералізації і сухого озолення з добавками. При цьому зменшується час пробопідготовки за рахунок одночасного використання окислювачів і проведення окислення за високої температури, скорочується кількість реактивів. Введення добавок у процесі мінералізації значно зменшує можливі втрати елементів. Мокру мінералізацію проводили нітратною кислотою і перекисом водню. Нітратна кислота переводить у розчин мікроелементи у вигляді розчинних у воді нітратів, видаляє хлор-іони у вигляді HCl і NOCl. Окислення органічних речовин однією нітратною кислотою відбувається важко. Для прискорення процесу окислення мінералізацію проводили з додаванням перекису водню. Для запобігання спінювання розчину спочатку пробу висушували, потім обробляли концентрованою нітратною кислотою, на наступному етапі мокрої мінералізації – сумішшю нітратної кислоти і перекису водню.

Визначення важких металів проводили методом інверсійної вольтамперометрії (ІВ) (свинець – згідно з ГОСТ 26932; кадмій – згідно з ГОСТ 26933; мідь – згідно з ГОСТ 26931; цинк – згідно з ГОСТ 26934) з використанням програмного забезпечення TA-lab та сучасного комп'ютера з відповідним програмним забезпеченням аналізатора. Метод ІВ-аналізу ґрунтується на здатності елементів, осаджених на ртутно-плівковому електроді, електрохімічно розчинятися при певному потенціалі, характерному для кожного елемента. Реєстрований максимальний анодний струм елемента лінійно залежить від концентрації елемента.

За стандартними методами визначали кислотність молока (ГОСТ 3624), вміст жиру (ГОСТ 5867), густину молока (ДСТУ 6082), масову частку білка (ГОСТ 23327, ГОСТ 25179), вміст кальцію визначали комплексонометричним методом.

Результати досліджень вмісту важких металів у сухому молоці представлені в табл. 1. та на рисунку.

Таблиця 1

Вміст важких металів

Зразок молока	Zn	Cd	Pb	Cu
Сухе незбиране, виробник 1	19,5 ± 3	Зал.	2,20 ± 0,02	3,40 ± 0,02
Сухе знежирене	3,72 ± 0,03	0,0058 ± 0,0004	0,70 ± 0,05	15,80 ± 0,5
Сухе незбиране, виробник 2	3,30 ± 0,20	0,0041 ± 0,0011	2,30 ± 0,04	3,00 ± 0,05
ГДК [16]	5	0,03	0,1	1

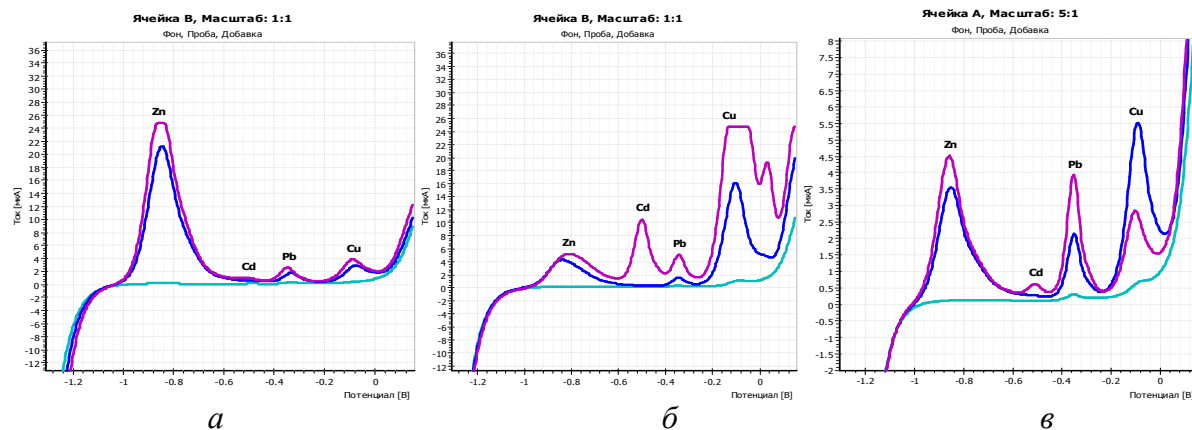


Рис. Вольтамперометричні криві:
 а – молоко сухе незбиране, виробник № 1; б – молоко сухе знежирене;
 в – молоко сухе незбиране, виробник № 2

Сухе незбиране молоко виробника № 1 має перевищення ГДК у 3,9 раза за Цинком, за Плюмбумом – у 22 рази, за Купрумом – у 3,4 раза. У сухому незбираному молоці виробника № 2 спостерігалось перевищення допустимих концентрацій Плюмбуму – у 23 рази, Купруму – у 3 рази. У сухому знежиреному молоці концентрація Плюмбуму перевищує ГДК у 7 разів, Купруму – в 15,8 раза. При цьому вміст Плюмбуму зростає зі збільшенням жирності продукту, що узгоджується з літературними даними.

У попередніх роботах [12] нами досліджений вміст важких металів у молоці незбираному з різних районів Чернігівської області та зразках пастеризованого молока, що дозволяє зробити висновок, що першопричиною перевищення допустимої концентрації важких металів у сухому молоці є перевищення їх вмісту у вихідній сировині.

Для дослідження детоксикаційних властивостей сорбентів нами було обране молоко незбиране зі Сновського району, де концентрація токсичних речовин у різні періоди лактації не перевищувала 2 ГДК (таке молоко вважається умовно-придатним і може бути використано для подальшої переробки [1]). Як сорбенти були обрані фармацевтичні препарати ентеросорбенти – атоксил, поліфам та ентегнін.

Спочатку нами був проведений аналіз впливу обраних сорбентів на зміну органолептичних властивостей молока-сировини при додаванні сорбентів. Сорбент ентегнін виявився гідрофільним, утворив із молоком стійку суспензію коричневого кольору, в зв'язку з чим у подальших дослідженнях нами не використовувався. Смак, колір та запах молока до та після детоксикації сорбентами атоксилем та поліфамом відповідають вимогам стандарту.

Дослідження ефективності очистки молочної сировини проводили за наступних умов: температура – 6 °С та 18 °С, композиція – 5 хв та 20 хв. Сорбенти вносили в молоко незбиране в концентраціях 0,5; 1,0; 5,0; 10,0 г/дм³. Після експозиції суміш фільтрували з наступною відцентровою очисткою молока від сорбентів. Результати досліджень наведені в табл. 2, 3.

Таблиця 2

Вміст важких металів у молоці ($T=18\text{ }^{\circ}\text{C}$, час експозиції – 5 хв, концентрація сорбенту 1 г/дм³)

Зразок молока	Zn	Cd	Pb	Cu
Без додавання сорбенту	4,6 ± 0,2	0,030 ± 0,001	0,24 ± 0,07	-
Після очистки поліфамом	3,10 ± 0,04	0,0068 ± 0,003	0,050 ± 0,002	3,10 ± 0,20
Після очистки атоксилем	4,10 ± 0,02	0,0048 ± 0,003	0,10 ± 0,02	3,70 ± 0,10

Концентрація Цинку та Купруму при додаванні сорбентів змінюється незначно. Додавання атоксилу зменшує концентрацію Плюмбуму в молоці незбираному на 58 %, Кадмію – на 84 %; додавання поліфаму – на 79 та 94 % відповідно. Таким чином, для подальших досліджень технологічних режимів детоксикації був обраний поліфам.

Таблиця 3

Ступінь очистки молока-сировини

Доза сорбенту, г/дм ³	Т, 6 °С		Т, 18 °С		Т, 6 °С		Т, 18 °С	
	5 хв	20 хв	5 хв	20 хв	5 хв	20 хв	5 хв	20 хв
	<i>Pb</i>				<i>Cd</i>			
0,5	82	83	78	79	79	79	75	77
1,0	84	85	79	79	80	79	77	77
5,0	84	85	80	80	79	79	79	77

Зменшення дози сорбенту до 0,5 г/дм³ практично не впливає на ступінь адсорбції важких металів. При зростанні концентрації сорбенту активність сорбції також змінюється незначно, тому збільшення дози сорбенту при детоксикації є недоцільною.

Згідно з отриманими даними, при будь-якій дозі сорбенту та температурі найбільший ступінь очистки від Плюмбуму та Кадмію спостерігали в перші п'ять хвилин експозиції. Зі збільшенням тривалості контакту сорбенту з молоком процент очищення збільшувався незначно.

Дослідження температурного режиму десорбції свідчить, що з підвищенням температури ефективність очистки дещо знижується. Це не суперечить літературним даним, оскільки процес екзотермічний і при підвищенні температури адсорбція зменшується.

Лігнін, що входить до складу поліфаму, має «неспецифічну» сорбційну здатність, тобто поряд зі здатністю зв'язувати токсичні речовини, одночасно адсорбує й корисні біологічно активні речовини. Присутність у лігніні фенольних гідроксилів визначає їх здатність зв'язувати більшою мірою катіони та в меншою – аніони, і таким чином впливати на мінеральний склад молока. У зв'язку з цим необхідно також було дослідити вплив сорбентів на основні фізико-хімічні показники молока-сировини. Результати досліджень наведені нижче.

Густина молока в середньому становила 1,0325 г/см³, додавання сорбентів практично не змінювало значення цього показника.

Титрована кислотність молока без сорбентів становила 18 Т°, введення атоксилу та поліфаму в досліджуваних концентраціях не впливало на значення кислотності.

Вміст жиру для незбираного молока без сорбенту становив 3,4 %. Результати аналізу вмісту жиру при додаванні сорбентів представлені в табл. 4.

Таблиця 4

Вміст жиру в молоці після очищення сорбентами

Доза сорбенту, г/дм ³	Поліфам				Атоксил			
	Т, 6 °С		Т, 18 °С		Т, 6 °С		Т, 18 °С	
	5 хв	20 хв	5 хв	20 хв	5 хв	20 хв	5 хв	20 хв
0,5	3,4	3,3	3,3	3,2	3,4	3,2	3,2	3,1
1,0	3,2	3,1	3,2	3,0	3,2	3,0	3,3	3,0
5,0	3,1	2,9	3,0	2,8	3,1	2,9	3,0	2,8
10,0	3,0	2,9	2,8	2,7	2,9	2,7	2,8	2,6

Зі збільшенням дози сорбенту та температури спостерігається зниження масової частки жиру, тому введення концентрацій сорбенту більше ніж 5 г/дм³ є недоцільним.

Вміст білка загального в молоці незбираному без сорбенту становив 3,06 %. Результати дослідження цього показника при додаванні поліфаму та атоксилу наведені в табл. 5.

Таблиця 5

Масова частка загального білка в молоці після очистки, %

Доза сорбенту, г/дм ³	Атоксил				Поліфам			
	Т, 6 °С		Т, 18 °С		Т, 6 °С		Т, 18 °С	
	5 хв	20 хв	5 хв	20 хв	5 хв	20 хв	5 хв	20 хв
0,5	2,87	2,87	2,87	2,87	2,97	2,97	2,97	2,87
1,0	2,78	2,78	2,78	2,78	2,87	2,87	2,87	2,87
5,0	2,78	2,69	2,69	2,69	2,78	2,59	2,69	2,49
10,0	2,49	2,40	2,49	2,40	2,69	2,59	2,49	2,40

Згідно з отриманими даними при збільшенні дози сорбенту та температури масова частка загального білка в молоці зменшується, тому за цим показником також не рекомендовано використання високих доз сорбенту.

Важливо було також дослідити, як обрані сорбенти впливають на вміст кальцію в молоці. Результати досліджень наведені в табл. 6.

Таблиця 6

Вміст кальцію у 100 г молока після очищення

Доза сорбенту г/дм ³	Поліфам				Атоксил			
	Т, 6 °С		Т, 18 °С		Т, 6 °С		Т, 18 °С	
	5 хв	20 хв	5 хв	20 хв	5 хв	20 хв	5 хв	20 хв
0,5	92	92	92	92	80	80	80	80
1,0	92	92	92	92	80	80	76	76
5,0	92	92	88	88	76	76	76	76
10,0	84	80	84	76	76	72	76	68

Відповідно до отриманих даних при збільшенні температури та дози сорбенту більше за 1 г/дм³ вміст кальцію в молоці зменшується.

Висновки відповідно до статті. Проведені дослідження дозволяють використовувати молоко-сировину з підвищеним вмістом важких металів для подальшого виробництва молочних продуктів. Органолептичні властивості молока після детоксикації сорбентами атоксилом та поліфамом відповідають вимогам ДСТУ 3662-97. За результатами досліджень обрані найкращі режими детоксикації молока-сировини: доза поліфаму – 0,5 г/дм³, температура – 6 °С, експозиція – 5 хв.

Контрольні заходи, які щодо зниження ризиків, викликаних важкими металами, можуть включати:

- контроль джерел постачання, тобто встановлення технічних умов на сировину та інгредієнти і сертифікація (атестація) постачальників, яка є підтвердженням допустимих рівнів вмісту важких металів у продукції, що ними постачається;
- технічний контроль, тобто контроль рецептур, контроль режимів внесення сорбенту;
- належне ізолювання сировини під час зберігання та застосування;
- контроль випадкового забруднення;
- періодичний контроль готового продукту.

Список використаних джерел

1. Димань Т. М., Мазур Т. Н. Безпека продовольчої сировини: підручник. Київ: ВЦ «Академія», 2011. 520 с.
2. Федорук Р. С., Ковальчук І. І. Біологічна цінність і якість молока в контексті техногенного забруднення природного середовища та екологічної безпеки. *Біологія тварин*. 2007. Т. 9, № 1-2. С. 10–19.
3. Детергенти сучасності: монографія / за ред. В. А. Бурлаки. Житомир: Вид-во «Житомирський національний агроекологічний університет», 2012. 652 с.
4. Романов Л. Важкі метали в молоці та продуктах його переробки. *Тваринництво України*. 2000. № 7-8. С. 19.
5. Кравців Р. Й., Буцяк Г. А. Сумісний вплив важких металів на організм тварин. *Науковий вісник ЛНУВМБТ імені С. З. Гжицького*. 2008. Т. 10, № 2 (37). С. 3–8.
6. Buialska N., Denisova N., Kupchik E. Problem of accumulation of heavy metals in medicinal plants. *Canadian scientific journal*. 2015. Issue 2. P. 13–19.
7. Кравців Р. Й. Продуктивність та обмін речовин у лактуючих корів за різного вмісту важких металів у раціонах. *Вісник аграрної науки*. 2004. № 1. С. 29–31.
8. Тарасенко Л. О., Рудь В. І. Санітарно-гігієнічна оцінка якості молока та молочних продуктів у залежності від періоду лактації корів української червоної молочної породи. *Науково-технічний бюлетень Інституту біології тварин і Державного науково-дослідного контрольного інституту ветеринарних та кормових добавок*. 2014. Вип. 15. № 2-3. С. 179–182.
9. Журавлева Н. И., Бубнов А. Г., Гриневич В. И. Экологический контроль уровня загрязнения свинцом и кадмием мяса и молока крупного рогатого скота. *Безопасность в техносфере*. 2011. № 3. С. 13–19.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

10. Забегалова Г. Н. Разработка технологических приемов детоксикации молока-сырья от солей тяжелых металлов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.18.04 / ФГОУ ВПО «Вологодская государственная молочнохозяйственная академия имени Н. В. Верещагина». Углич, 2006. 22 с.
11. Потороко И. Ю., Забодалова Л. А. Влияние методов детоксикации на технологические свойства молочного сырья. *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств»*. 2011. № 2. URL: <http://www.open-mechanics.com/journals>.
12. Дослідження вмісту важких металів в молоці як елемент реалізації системи НАССР / Н. Буяльська [та ін.]. *Технічні науки та технології*. 2017. № 2 (8). С. 179–187.
13. ДСТУ 4273:2015 Молоко та вершки сухі. Загальні технічні умови. [Чинний від 01.01.2016]. Київ: ДГІ «УкрНДНЦ», 2015. 15 с.
14. ДСТУ 3662-97 Молоко коров'яче незбиране. Вимоги при закупівлі. [Чинний від 01.07.2002]. Київ: Держстандарт України, 1997. 29 с.
15. ДСТУ ISO 707:2002 Молоко та молочні продукти. Настанови з відбирання проб. [Чинний від 01.10.2003]. Київ: Держстандарт України, 2004. 35 с.
16. Медико-биологические требования и санитарные нормы качества продовольственного сырья и пищевых продуктов (Медико-біологічні вимоги та санітарні норми якості продовольчої сировини та харчових продуктів). МБТ и СН № 5061. [Чинний від 1989-08-01]. МОЗ СРСР, 1989.

References

1. Dyman, T. M., Mazur, T. N. (2011). *Bezpeka prodovolchoi syrovyny : Pidruchnyk [Safety of food raw materials: Textbook]*. Kyiv: VTs «Akademiiia» [in Ukrainian].
2. Fedoruk, R. S., Kovalchuk, I. I. (2007). Biologichna tsinnist i yakist moloka v konteksti tekhnogennoho zabrudnennia pryrodnoho seredovyscha ta ekolohichnoi bezpeky [Biological value and quality of milk is in context of technogenic contamination of natural environment and ecological safety]. *Biologhiia tvaryn – The animal biology*, 9 (1–2), 10–19 [in Ukrainian].
3. Burlaka, V. (Ed.), Grabar, I., Mykytyuk, V., Zasekin, D., Borshchenko, V., Suknenko, T. ... Tumanov, V. (2012). *Deterhenty suchasnosti [Detergents of our time]*. Zhytomyr: Vyd-vo «Zhytomyrskiyi natsionalnyi ahroekolohichniy universytet» [in Ukrainian].
4. Romanov, L. (2000). Vazhki metaly v molotsi ta produktakh yoho pererobky [Heavy metals in milk and products of its processing]. *Tvarynystvo Ukrainy – Livestock of Ukraine*, 7–8, 19 [in Ukrainian].
5. Kravtsiv, R. Y., Butsiak, H. A. (2008). Sumisnyi vplyv vazhkykh metaliv na orhanizm tvaryn [The combined effect of heavy metals on animals]. *Naukovyi visnyk LNUVMBT imeni S.Z. Hzhystyko – Scientific messenger of LNUVMB named after S. Z. Gzhystyij*, 10, 2 (37), 3–8 [in Ukrainian].
6. Buialska, N., Denisova, N., Kupchik, E. (2015). Problem of accumulation of heavy metals in medicinal plants. *Canadian scientific journal*, 2, 13–19 [in English].
7. Kravtsiv, R. I. (2004). Produktivnist ta obmin rechovyn u laktuiuchykh koriv za riznoho vmistu vazhkykh metaliv u ratsionakh [Productivity and metabolism in lactating cows at different level of heavy metals in rations]. *Visnyk ahrarnoi nauky – Bulletin of Agricultural Science*, 1, 29–31 [in Ukrainian].
8. Tarasenko, L. O., Rud, V. I. (2014). Sanitarno-hihienichna otsinka yakosti moloka ta molochnykh produktiv u zalezhnosti vid periodu laktatsii koriv ukrainskoi chervonoj molochnoj porody [Sanitary-hygienic assessment of the quality of milk and dairy products, depending on the period of lactation cows ukrainian red dairy breed]. *Naukovo-tekhnichnyi biuleten Instytutu biologii tvaryn i Derzhavnoho naukovodoslidnoho kontrolnoho instytutu vetpreparativ ta kormovykh dobavok – The scientific and technical bulletin of the SCIVP of veterinary medical products and feed additives*, 15 (2–3), 179–182 [in Ukrainian].
9. Zhuravleva, N. I., Bubnov, A. G., Grinevich, V. I. (2011). Ekologicheskii kontrol urovnia zagriazneniia svintsom i kadmiem miasa i moloka krupnogo rogatogo skota [Ecological control of the level of contamination with lead and cadmium of meat and milk of cattle]. *Bezopasnost v tekhnosfere – Safety in technosphere*, 3, 13–19 [in Russian].
10. Zabegalova, G. N. (2006). *Razrabotka tekhnologicheskikh priemov detoksikatsii moloka-syria ot solei tiazhelykh metallov [Development of technological methods for detoxifying raw milk from salts of heavy metals]*. (Doctor's thesis). FGOU VPO «Vologodskaia gosudarstvennaia molochnokhoziaistvennaia akademiia imeni N. V. Vereshchagina», Uglich [in Russian].
11. Potoroکو, I. Iu., Zabodalova, L. A. (2011). Vliianie metodov detoksikatsii na tekhnologicheskie svoistva molochnogo syria [Impact of detoxification methods on technological properties of crude dairy material]. *Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya «Protcessy i apparaty pishchevykh proizvodstv» – Scientific Journal NRU ITMO. Processes and Food Production Equipment*, 2. Retrieved from <http://www.open-mechanics.com/journals>.

12. Buial'ska, N., Denysova, N., Kupchik, O., Prus, T. (2017). Doslidzhennia vmistu vazhkykh metaliv v molotsi yak element realizatsii systemy HACCP [Research of heavy metals content in milk as an element of the implementation of HACCP]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, 2 (8), 179–187 [in Ukrainian].

13. Moloko ta vershky sukhi. Zahalni tekhnichni umovy [Dry milk and cream. General specifications]. DSTU 4273:2015 (January 1, 2016).

14. Moloko koroviache nezbyrane. Vymohy pry zakupivli [Whole cow milk. Requirements for purchasing]. DSTU 3662-97 (July 1, 2002).

15. Moloko ta molochni produkty. Nastanovy z vidbyrannia prob [Milk and dairy products. Guidance on sampling]. DSTU ISO 707:2002 (October 1, 2003).

16. Mediko-biologicheskie trebovaniia i sanitarnye normy kachestva prodovol'stvennogo syria i pishchevykh produktov (Medyko-biologichni vymohy ta sanitarni normy yakosti prodovolchoi syrovyny ta kharchovykh produktiv) [Medical and biological requirements and sanitary standards of quality of food raw materials and food products] (1989). MBT i SN 5061 from 01.08.1989 № 5061.

UDC 637.07

Nataliia Buial'ska, Elena Kupchik, Natalia Denisova

USE OF SORBENTS FOR REDUCING THE CONCENTRATION OF HEAVY METALS IN MILK RAW MATERIAL

Urgency of the research. Heavy metals are one of the most toxic and most common chemical food contaminants, in particular dairy. To date, there is an urgent need to determine their content and to find ways in order to reduce the risks caused by the use of contaminated food.

Target setting. Redistribution of heavy metals during technological processes does not always ensure the production of products with a safe level of toxic metals, so it is necessary to select sorbents and to search for optimal technological regimes for detoxifying the milk raw material.

Actual scientific researches and issues analysis. The scientific works of many well-known scientists and practitioners is devoted to the solution of scientific and practical issues related to the monitoring of heavy metals in food products and to the development of methods for their elimination.

Uninvestigated parts of general matters defining. In literary sources there is practically no information on the content of heavy metals in dry milk. Their effect on the content of calcium, protein, fat, etc. in milk is not always taken into account in the scientific works devoted to the choice of sorbents for detoxification of the milk raw material.

The research objective. The purpose of the work is to determine the content of heavy metals in dry milk, to analyze pathways for them and on the basis of the obtained results to develop technological regimes and methods for detoxifying heavy metals.

The statement of basic materials. The results of the analysis of heavy metals in dry milk are given. Methods for reducing the concentration of Pb and Cd in dairy raw materials using sorbents are proposed. The influence of sorbents on the quality of raw materials has been studied. It is established that the use of polypham does not affect the organoleptic and basic physicochemical parameters of milk. The degree of purification of dairy raw material from heavy metals is determined. The optimal conditions for the detoxification process by polypham (temperature, time of exposure of the sorbent and its concentration) are established.

Conclusions. The carried out researches allow to use dairy raw material with the raised maintenance of heavy metals in the further manufacture of dairy products.

Keywords: food contamination; heavy metals; sorbents; detoxification; voltammetric analysis.

Fig.: 1. Table: 6. References: 16.

Буяльська Наталія Павлівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри харчових технологій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Buial'ska Nataliia – PhD in technical sciences, Associate Professor, Department of Food Technology, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: buial'ska@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6800-5604>

ResearcherID: G-2935-2014

Scopus Author ID: 57196191416

Купчик Олена Юрійвна – кандидат хімічних наук, доцент кафедри хімії, Чернігівський національний педагогічний університет імені Т. Г. Шевченка (вул. Гетьмана Полуботка, 53, м. Чернігів, 14000, Україна).

Kupchik Elena – PhD in Chemical Sciences, Associate Professor of the Chemical Department, Chernihiv T. G. Shevchenko National Pedagogical University (53 Polubotka Str., 14000 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: kupchik.olena@gmail.com

Денисова Наталя Миколаївна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри харчових технологій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Denisova Natalia – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Food Technology, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: 4386793@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3522-4210>

ResearcherID: G-6068-2016

Вікторія Дорохович, Анна Донець

ЗМЕНШЕННЯ ГЛІКЕМІЧНОСТІ ТА КАЛОРІЙНОСТІ ПРЯНИКІВ ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ ЦУКРОЗАМІННИКІВ МАЛЬТИТОЛА ТА ІЗОМАЛЬТИТОЛА

Актуальність теми дослідження зумовлена обмеженим асортиментом борошняних кондитерських виробів для хворих на цукровий діабет.

Постановка проблеми. Традиційні кондитерські вироби (на цукрі) мають високий рівень глікемічності і їх не рекомендовано споживати хворим на цукровий діабет. Для цієї групи населення потрібно розробляти вироби із заміниками цукру.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існують роботи з розроблення здобного, цукрового, зтяжженого печива, кексів, маффінів, бісквітних напівфабрикатів із застосуванням цукрозамінників-поліолів.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Пряники з повною заміною цукру на цукрозаміники-поліолі в Україні не виробляють, що обумовлює доцільність їх розроблення.

Постановка завдання. Визначити органолептичні показники пряників, встановити доцільне співвідношення суміші ізомальтитол-фруктоза, розрахувати харчову, енергетичну цінність та показник глікемічності.

Виклад основного матеріалу. Встановлено, що пряники на мальтитолі мають достатній рівень солодкості, на ізомальтитолі – занижений. З метою підвищення рівня солодкості запропоновано використовувати фруктозу в суміші з ізомальтитолом у співвідношенні 0,5:0,5 та 0,7:0,3.

Застосування мальтитолу та ізомальтитолу не сприяє істотному зниженню калорійності, максимальне зниження до 10 %. Показник глікемічності пряників на мальтитолі знижується на 16 %, на ізомальтитолі на 30 %, що дозволяє позиціонувати пряник як «виріб із редукованою глікемічністю». Застосування фруктози підвищує показник глікемічності на 2-4 %.

Висновки відповідно до статті. Впровадження у виробництво розроблених пряників дозволить розширити асортимент борошняних кондитерських виробів, які зможуть споживати хворі на цукровий діабет.

Ключові слова: цукровий діабет; цукрозамінники; органолептичні показники; харчова та енергетична цінність; показник глікемічності.

Табл.: 4. Бібл.: 11.

Актуальність теми дослідження. Здоров'я є однією з найважливіших цінностей для людини, дає можливість вести повноцінне й активне життя. Однак із кожним роком стан здоров'я населення України погіршується. Це пов'язано з низкою факторів, серед яких провідне місце посідає невідповідне харчування. Надходження до організму людини великої кількості легкозасвоюваних вуглеводів може спричинити появу надлишкової маси тіла (ожиріння) та цукрового діабету.

У 2013 році Продовольча та сільськогосподарська організація ООН оприлюднила звіт із проблем ожиріння, згідно з яким в Україні 20 % населення мають надлишкову масу тіла. В Україні кількість зареєстрованих хворих на цукровий діабет – 1,3 млн людей, але, за свідченнями медиків, це дуже занижена цифра. Дійсна кількість хворих та осіб, які перебувають у переддіабетичному стані, набагато більша. За прогнозами до 2030 року ймовірний приріст захворювань на цукровий діабет в Україні може досягати 85 % (порівняно з 2015 роком) [1; 2]. Хворим на цукровий діабет доцільно споживати продукти, які мають невисокий глікемічний індекс, традиційні кондитерські вироби, до складу яких входить цукор, споживати не рекомендовано.

Унаслідок цього актуальним завданням є розроблення кондитерських виробів для хворих на цукровий діабет.

Постановка проблеми. Традиційні кондитерські вироби виготовляють на цукрі білому, який має досить високий глікемічний індекс і не рекомендується до споживання хворими на цукровий діабет та особам, що перебувають у переддіабетичному стані.

Для цієї групи населення потрібно розробляти кондитерські вироби із заміниками цукру, які мають низький глікемічний індекс.

До таких речовин відносяться цукрозамінники-поліолі: лактитол, ізомальтитол, мальтитол та ін. Однак в Україні вони не знайшли широкого застосування, і в технологіях кондитерських виробів для хворих на цукровий діабет переважно використовують фруктозу, яка належить до групи «цукри».

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існують розробки борошняних кондитерських виробів (БКВ) із застосуванням низькоглікемічних цукрозамінників-поліолів.

Під керівництвом доктора технічних наук, професора Національного університету харчових технологій А. М. Дорохович захищено дисертаційні роботи, де розроблено БКВ: печиво, пряники, кекси із застосуванням сорбітолу [3]; печиво цукрове, затяжне із застосуванням лактитолу, суміші лактитол+фруктоза [4]; білково-збивне печиво із застосуванням лактитолу та ізомальтитолу [5].

У дисертаційній роботі [6], серед іншого, розроблено здобне та білково-збивне печиво, кекси, бісквітні напівфабрикати на лактитолі, ізомальтитолі, суміші лактитол та фруктози. У дисертаційній роботі розроблено [7] бісквітні напівфабрикати на пшеничному борошні із застосуванням ізомальтитолу, мальтитолу, еритритолу.

Цінним збагаченням борошняних кондитерських виробів є горох, квасоля та інші бобові культури, також використання цукрозамінників нового покоління. У США та Канаді успішно застосовують білковий концентрат із горохового борошна та насіння бобової культури вігні, також поширене виробництво кондитерських виробів із використанням еритритолу [8; 9].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. На теперішній час відсутні розробки пряників із повною заміною цукру на низькоглікемічні цукрозамінники-поліоли. Пряники є досить популярними у населення України, тому розроблення їх на основі низькоглікемічних цукрозамінників сприятиме розширенню асортименту борошняних кондитерських виробів, які можна рекомендувати не тільки особам, хворим на цукровий діабет, а і здоровим особам.

Постановка завдання. Визначити органолептичні показники пряників на мальтитолі, ізомальтитолі та здійснити заходи для наближення їх до відповідних показників пряників на цукрі білому. Розрахувати харчову, енергетичну цінність, показник глікемічності та встановити ступінь їх зменшення, визначення можливості надати пряникам на мальтитолі, ізомальтитолі статусу «виріб із редукованою глікемічністю».

Виклад основного матеріалу. За результатами попередніх досліджень підібрано рецептурний склад пряників на мальтитолі та ізомальтитолі. Це: борошно пшеничне вищого сорту, меланж, масло вершкове, мальтитол/ізомальтитол, солодовий екстракт, розпушувачі: вуглеамонійна сіль, сода харчова, «букет» прянощів. Як контроль – аналогічна рецептура на цукрі білому.

На першому етапі досліджень визначено органолептичні показники пряників на мальтитолі й ізомальтитолі та здійснено їх бальне оцінювання (табл. 1). За ДСТУ 4187-2003 «Вироби кондитерські пряникові» такі органолептичні показники, як смак та запах характеризуються разом. Однак у разі розроблення нових найменувань виробів вважаємо за доцільне оцінювати кожний із них окремо.

Таблиця 1

Органолептична оцінка пряників на мальтитолі й ізомальтитолі

Назва показника	Характеристика органолептичних показників			
	пряник на мальтитолі		пряник на ізомальтитолі	
	опис	у балах	опис	у балах
Форма	Правильна, випукла, не розпливчаста	5	Правильна, випукла, не розпливчаста	5
Поверхня	Не підгоріла, без тріщин	5	Не підгоріла, із незначними тріщинами	4,5
Колір	Світло-коричневий, властивий цьому рецептурному складу	5	Світло-коричневий, властивий цьому рецептурному складу	5
Смак	Достатньо виражений солодкий смак, без сторонніх присмаків	5	Мало виражений солодкий смак, без сторонніх присмаків	3,5
Запах	Властивий пропеченим пряниковим виробам, без сторонніх присмаків	5	Властивий пропеченим пряниковим виробам, без сторонніх присмаків	5
Вигляд у розломі	Пропечені, з розвиненою пористістю, без ущільнень	5	Пропечені, з розвиненою пористістю, є незначні ущільнення	4,5

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

За результатами органолептичного оцінювання можна зробити висновок, що пряник на ізомальтитолі має недостатній рівень солодкості. Це зумовлено низьким рівнем солодкості ізомальтитолу (табл. 2). Традиційні пряники на цукрі мають досить виражений солодкий смак, і саме до таких виробів звик споживач. Тому доцільно розширити «лінійку» пряників на ізомальтитолі та розробити вироби з різною інтенсивністю солодкого смаку. Застосування інтенсивних підсолоджувачів з цією метою вважаємо недоцільним, оскільки, крім солодкого смаку, солодка речовина повинна брати участь в утворенні структури пряника. Для збільшення солодкості виробу запропоновано використовувати фруктозу, яка має яскраво виражений солодкий смак і бере участь в утворенні структури тіста і готових виробів.

Враховуючи рівень солодкості ізомальтитолу та фруктози (табл. 2) для створення суміші з рівнем солодкості 1,0 (як у цукру) співвідношення ізомальтитол та фруктоза повинно бути 1:1.

Таблиця 2

Якісні показники цукрі та цукрозаміників

Назва цукру та цукрозамінника	Солодкість, SES	Енергетична цінність, ккал	Глікемічний індекс, %
Цукор білий	1,0	4,0	68,0
Фруктоза	1,5	4,0	20,0
Мальтитол	0,9	2,4	36,0
Ізомальтитол	0,5	2,4	9,0

Джерело: [10].

Пряники, виготовлені за таким співвідношенням ізомальтитолу та фруктози, мали яскраво виражений солодкий смак, який був оцінений у 5 балів. Однак застосування фруктози буде збільшувати глікемічність та калорійність виробу. Тому було виготовлено ще один зразок пряника, де зменшено кількість фруктози в суміші ізомальтитол-фруктоза, їх співвідношення становило 0,7:0,3. У цьому разі пряники мали менш виражений солодкий смак, який був оцінений у 4,5 бали, що є цілком достатнім.

Розрахунок харчової цінності (табл. 3) показав, що нові пряники на мальтитолі, ізомальтитолі, суміші ізомальтитол та фруктоза за кількістю білків і жирів аналогічні до традиційних виробів на цукрі, відбувається зміна вуглеводної складової виробів.

Таблиця 3

Харчова цінність пряників на мальтитолі, ізомальтитолі, суміші ізомальтитол та фруктоза

Пряник на	Кількість, г/100 г			
	білки	жири	вуглеводи	
			моно-, ди-, полісахариди	поліоли
цукрі білому	6,7	10,6	66,8	–
мальтитолі	6,9	10,9	42,1	24,0
ізомальтитолі	6,7	10,7	41,2	25,4
ізомальтитолі та фруктозі (співвідношення 0,5:0,5)	6,8	10,6	53,8	12,8
ізомальтитолі та фруктозі (співвідношення 0,7:0,3)	6,8	10,6	48,4	17,9

Мальтитол та ізомальтитол є цілком безпечними цукрозамінниками. Якщо враховувати загальну для поліолів рекомендацію – разове споживання повинно не перевищувати 20...30 г, то зважаючи на їх кількість у пряниках, останні одночасно можна споживати до 100 г, що є досить значною кількістю.

Розрахунок енергетичної цінності (калорійності) показав, що в разі застосування мальтитолу й ізомальтитолу значного зниження калорійності не відбувається, максима-

льне зниження до 10 % (табл. 4). З огляду на це доцільним є продовження роботи в напрямі зниження калорійності пряників. Це може бути реалізовано за рахунок зменшення жирової складової – застосування замінників жиру. Так, наприклад, якщо зменшити кількість жиру на 30 %, то загальне зменшення калорійності може бути на 17...18 %. Можна пропонувати застосування харчових волокон, які будуть надавати виробам оздоровчих, функціональних властивостей та сприяти зменшенню їхньої калорійності.

Таблиця 4

Енергетична цінність та показник глікемічності пряників

Пряник на	Енергетична цінність		Показник глікемічності	
	ккал	% зменшення	од.	% зменшення
цукрі білому	387	–	43,4	–
мальтитолі	342	9,8	37,3	16
ізомальтитолі	351	9,3	30,3	30
ізомальтитолі та фруктозі (співвідношення 0,5:0,5)	362	6,5	31,8	26
ізомальтитолі та фруктозі (співвідношення 0,7:0,3)	357	7,8	31,2	28

Важливим для позиціонування виробів як продуктів, призначених для хворих на цукровий діабет, є глікемічний індекс. Глікемічний індекс визначається за аналізом крові й залежить від багатьох факторів.

Професор А. М. Дорохович розробив методику розрахунку показника глікемічності, (ПГ) за якою був розрахований ПГ для розроблених пряників (табл. 4). В основу розрахунку покладено метод визначення пойменної кількості вуглеводів у 100 г харчового продукту та їх глікемічного індексу (ГІ) [11].

Встановлено, що застосування ізомальтитолу, мальтитолу та суміші ізомальтитол+фруктоза сприяє зниженню показника глікемічності. Найбільш інтенсивне зниження ПГ відзначається в пряниках на ізомальтитолі. У пряниках із застосуванням фруктози показник глікемічності дещо збільшується, але він і в цьому випадку менше, ніж у виробках на цукрі, а саме більше ніж на 25 %, що дозволяє позиціонувати ці пряники як «вироби з редукованою калорійністю».

Висновки відповідно до статті. Пряники на мальтитолі та суміші ізомальтитол і фруктоза мають гарні органолептичні показники, високий рівень солодкості, до якого звикли споживачі. Пряник на ізомальтитолі має яскраво виражений солодкий смак. Застосування мальтитолу та ізомальтитолу не сприяє істотному зменшенню енергетичної цінності, максимальне зниження до 10 %. За зменшенням показника глікемічності пряники на ізомальтитолі та суміші ізомальтитол і фруктоза можуть позиціонуватись як «вироби з редукованою глікемічністю».

Впровадження у виробництво розроблених пряників сприятиме розширенню асортименту борошняних кондитерських виробів для хворих на цукровий діабет.

Список використаних джерел

1. IDF Diabetes Atlas. 2015. 4th ed. Online version of IDF Diabetes Atlas. URL: www.idf.org/diabetesatlas.
2. Як здоровий спосіб життя зменшує ризики появи діабету. URL: <http://moz.gov.ua/article/health/jak-zdorovij-sposib-zhittja-zmenschue-riziki-pojavi-diabetu>.
3. Поліщук Т. Я. Разработка рациональных технологий производства диабетических мучных кондитерских изделий: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.18.01 «Технология хлебопекарных, макаронных и кондитерских продуктов» / Киевский ордена Трудового Красного Знамени технологический институт пищевой промышленности. Киев, 1990. 24 с.
4. Яременко О. М. Удосконалення технології печива шляхом зниження глікемічності, калорійності та покращення фізіологічної цінності: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.18.01

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

«Зберігання і технологія переробки зерна, виготовлення зернових і хлібопекарських виробів та комбікормів» / Національний університет харчових технологій. Київ, 2010. 20 с.

5. Прилуцька Л. П. Удосконалення технологій білково-збивного печива на основі цукроза-міників: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.18.01 «Зберігання і технологія переробки зерна, виготовлення зернових і хлібопекарських виробів та комбікормів» / Національний університет харчових технологій. Київ, 2010. 20 с.

6. Дорохович В. В. Наукове обґрунтування і розроблення технологій борошняних кондитерських виробів спеціального дієтичного споживання: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: спец. 05.18.16 «Технологія продуктів харчування» / Київ. нац. торг.-екон. ун-т. Київ, 2010. 38 с.

7. Абрамова А. Г. Удосконалення технологій бісквітів пониженої глікемічності та калорійності шляхом використання цукрозаміників нового покоління: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.18.01 – Технологія хлібопекарських продуктів, кондитерських виробів та харчових концентратів / Національний університет харчових технологій. Київ, 2016. 21 с.

8. Sweeteners and sugar alternatives in food technology / Edited by H. Mitchell. Oxford: Black Well Publishing, 2006. 432 p.

9. Полумбрик М. О. Вуглеводи в харчових продуктах і здоров'я людини. Київ: Академперіодика, 2011. 487 с.

10. Корпачов В. В. Сахара и сахарозаменители. Київ: Книга плюс, 2004. 320 с.

11. Патент 40063 України МПК (2009) А 23L 1/10 Спосіб визначення показника глікемічності харчових продуктів / Дорохович А. М., Ковбаса В. М., Дорохович В. В., Гуліч М. П., Яременко О. М. № 2000940063; заявл. 10.07.2008; опубл. 27.04.2009, Бюл. № 8.

References

1. IDF Diabetes Atlas (2015). 4th ed. Online version of IDF Diabetes Atlas. Retrieved from www.idf.org/diabetesatlas.

2. *Iak zdravnyi sposib zhyttia zmenshuie ryzyky poiavy diabetu [How a healthy lifestyle reduces the risk of diabetes]*. Retrieved from <http://moz.gov.ua/article/health/jak-zdorovij-sposib-zhittja-zmenshue-riziki-pojavi-diabetu>.

3. Polishchuk, T. Ya. (1990). *Razrabotka ratsyonalnykh tekhnolohiyi proyzvodstva dyabetycheskykh muchnykh kondyterskykh yzdely [Development of rational technologies for the production of diabetic flour confectionery products]* (Candidate's thesis). Kiev Order of the Red Banner of Labor Technological Institute of Food Industry, Kiev [in Russian].

4. Yaremenko, O. (2010). *Udoskonalennia tekhnolohii pechyva shliakhom znyzhennia hlike-michnosti, kaloriinosti ta pokrashchennia fiziologichnoi tsinnosti [Improvement of cookie technology by reducing glycemicity, caloric content and improving physiological value]* (Candidate's thesis). National University of Food Technology, Kyiv [in Ukrainian].

5. Prylutska, L. (2010). *Udoskonalennia tekhnolohii bilkovo-zbyvnoho pechyva na osnovi tsukrozaminykiv [Improvement of technologies of protein-reduced biscuits on the basis of sugar substitutes]* (Candidate's thesis). National University of Food Technology, Kyiv [in Ukrainian].

6. Dorohovych, V. (2010). *Naukove obgruntuvannia i rozroblennia tekhnolohii boroshnianykh kondyterskykh vyrobiv spetsialnoho diietynoho spozhyvannia [Scientific substantiation and development of technologies of flour confectionery products for special dietary consumption]* (Doctor's thesis). Kyiv National Trade and Economics University, Kyiv [in Ukrainian].

7. Abramova, A. (2016). *Udoskonalennia tekhnolohii biskvitiv ponyzhenoї hlike-michnosti ta kaloriinosti shliakhom vykorystannia tsukrozaminykiv novoho pokolinnia [Improvement of the technology of low glycemic and calorie biscuits using sugary substitutes of the new generation]*. (Candidate's thesis). National University of Food Technology, Kyiv [in Ukrainian].

8. Mitchell, H. (Ed.) (2006). *Sweeteners and sugar alternatives in food technology*. Oxford: Black's Well Publishing [in Ukrainian].

9. Polumbrik, M. O. (2011). *Vuhlevody v kharchovykh produktakh i zdorovia liudyny [Carbohydrates in food products and human health]*. Kyiv: Akademperiodika [in Ukrainian].

10. Korpachov, V. (2004). *Sakhara y sakharozamenytely [Sahara and sugar substitutes]*. Kyiv: Book Plus [in Ukrainian].

11. Dorokhovych, A. M., Kovbasa, V. M., Dorokhovych, V. V., Hulich, M. P., Yaremenko, O. M. (2009). *Sposib vyznachennia pokaznyka hlikemichnosti kharchovykh produktiv [Method of determining the index of glycemicy of food products]*. Patent 40063 of Ukraine IPC A 23L 1/10.

UDC 664.681

Victoriya Dorohovich, Anna Donets

REDUCTION OF GLYCEMICITY AND CALORIUM OF GINGERBREAD BY APPLICATION OF SUGAR SUBSTITUTES MALTITOL AND ISOMALTITOL

Urgency of the research a limited range of flour confectionery products for patients with diabetes.

Target setting. Traditional confectionery products (on sugar) have a high glycemic level and are recommended for patients with diabetes. For this population, you need to develop products with sugar substitutes.

Actual scientific researches and issues analysis. There are contributions on the development of butter, sugar, protracted cookies, muffins, biscuit semi-finished products using sugar substitutes-polyols.

Uninvestigated parts of general matters defining. Gingerbread with a complete replacement of sugar for sugar substitutes - polyols in Ukraine do not produce, which determines the feasibility of their development.

The research objective. To determine the detection by smelling of gingerbread, to establish expediency of a mixture of isomaltitol-fructose, to calculate the nutritional, energy value and glucose index.

The statement of basic materials. It has been established that gingerbread cookies for maltitol have a sufficient level of sweetness, and for isomaltol - it is rather low. In order to increase the level of sweetness, it was proposed to use fructose in a mixture with isomaltitol in a ratio of 0.5:0.5 and 0.7:0.3.

The use of maltitol and isomaltitol does not contribute to a significant reduction in caloric content, the maximum reduction to 10%. Glycemicity index of gingerbread on maltitol is reduced by 16%, on isomaltitoli by 30%, which allows positioning the gingerbread as a "product with a reduced glycemic load". The use of fructose increases the glycemic index by 2-4%.

Conclusions. The introduction of the developed gingerbread into production will expand the range of flour confectionery products that patients with diabetes can consume.

Keywords: diabetes mellitus; sugar substitutes; organoleptic characteristics; nutritional and energy value; glycemic index. Table: 4. References: 11.

Дорохович Вікторія Віталіївна – доктор технічних наук, доцент, Національний університет харчових технологій (вул. Володимирська 68, м. Київ, 01033, Україна).

Dorohovich Victoriya – Doctor of Technical Sciences, assistant professor, National University of Food Technologies (68 Volodymyrska Str., 01033 Kyiv, Ukraine).

E-mail: dora@nuft.edu.ua

Донець Анна Сергіївна – аспірант, старший лаборант за сумісництвом, Національний університет харчових технологій (вул. Володимирська 68, м. Київ, 01033, Україна).

Donets Anna – PhD student, Senior laboratory assistant part-time, National University of Food Technologies (68 Volodymyrska Str., 01033 Kyiv, Ukraine).

E-mail: annadonec9@gmail.com

Дмитро Жигунов, Василина Ковальова, Михайло Ковальов, Олена Коритнюк

ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ІНДИВІДУАЛЬНИХ ПОТОКІВ БОРОШНА ІЗ ЗАВОДУ ЗІ СКОРОЧЕНОЮ СХЕМОЮ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

Актуальність теми дослідження. *Визначення якості індивідуальних потоків борошна на заводі зі скороченою схемою технологічного процесу з використанням міжнародних стандартів – перспективний інноваційний напрям розвитку борошномельної промисловості.*

Постановка проблеми. *Оцінка якості індивідуальних потоків борошна на заводах малої продуктивності дає можливість проаналізувати ефективність роботи та потенціал підприємства.*

Аналіз останніх досліджень і публікацій. *Були розглянуті як класичні роботи, так і сучасні публікації у вітчизняних та закордонних джерелах, що відповідають цій проблемі.*

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. *У літературі відсутня інформація щодо аналізу показників якості індивідуальних потоків борошна із заводів України невеликої продуктивності з використанням міжнародних стандартів.*

Постановка завдання. *Метою дослідження є визначення основних показників якості борошна і встановлення закономірності їх зміни на різних етапах технологічного процесу із заводу зі скороченою схемою технологічного процесу.*

Виклад основного матеріалу. *У статті наведено результати досліджень показників якості борошна з різних етапів технологічного процесу на заводі зі скороченою схемою технологічного процесу та показано зміни показників залежно від системи технологічного процесу. Встановлено, що потоки борошна із систем першої якості мають кращі технологічні властивості. Так, на шліфувальних і розмелювальних системах білість борошна – від 54 до 68 од., зольність даних потоків є найнижчою – від 0,45 до 0,54 %. Кількість клейковини на драних і сортувальних системах коливається в межах від 19,5 % до 35,6 %, на шліфувальних і розмелювальних системах – від 23,8 до 33,6 %, а якість клейковини (ІДК) має майже однакові властивості як на шліфувальних і розмелювальних системах, так і на драних і сортувальних системах – від 53 до 86 од. Показник седиментації борошна має високі значення на драних системах, сортувальних системах – від 38 до 44 мл за рахунок високого вмісту клейковини на даних системах.*

Висновки відповідно до статті. *За результатами пробного лабораторного випікання, потоки борошна мали невисокі хлібопекарські властивості. На драних і сортувальних системах першої якості об'єм хліба коливався в межах від 380 до 410 см³, на драних і сортувальних системах вимелу – 410 см³, на шліфувальних і розмелювальних системах першої якості – від 380-460 см³. У статті вперше з використанням приладу SDmatic проведено аналіз кількості пошкодженого крохмалю в потоках борошна на заводі зі скороченою схемою технологічного процесу. Результати досліджень можуть бути використані борошномельними виробництвами для стабілізації якості кінцевої продукції.*

Ключові слова: *борошно; технологічний процес; клейковина; білість; зольність; седиментація; пошкоджений крохмаль; водопоглинальна здатність.*

Табл.: 1. Рис.: 2. Бібл.: 11.

Актуальність теми дослідження. *Визначення якості індивідуальних потоків борошна на заводі зі скороченою схемою технологічного процесу з використанням міжнародних стандартів – перспективний інноваційний напрям розвитку борошномельної промисловості.*

Постановка проблеми. *В Україні з пшениці виробляють хлібопекарське борошно вищого, першого, другого сортів і обойне. Пшеничне сортове борошно виробляють із м'якої пшениці або з додаванням не більше 20 % твердої [1]. При сортовому помелу борошно вищого, першого і другого сортів формують шляхом змішування десятків різноякісних потоків борошна з різних систем технологічного процесу, що мають різний набір показників якості, які залежать, у свою чергу, від показників якості зерна, що переробляється, структури технологічного процесу (розвиненості технологічної схеми), режимів роботи систем подрібнення та просіювання [2; 3]. Окремі частини зерна відрізняються структурою, хімічним складом, фізико-хімічними і хлібопекарськими властивостями. Так, борошно певного сорту, що відпускається споживачу, повинно мати обмежувальні показники якості відповідно до вимог стандартів, тому в технології передбачено змішування різноякісних потоків борошна в певному співвідношенні до гомогенного стану, в результаті чого утворюється сорт або тип борошна [4].*

Аналіз останніх досліджень і публікацій. *Потоки борошна відрізняються виходом, мають різний набір показників білості, зольності, містять різне співвідношення анатомічних частин зерна (ендосперму й оболонки), а також відрізняються сукупністю показників, що оцінюють хлібопекарські властивості, такими як вміст білка, кількість, пружність*

і еластичність клейковини і т. ін. [5]. Знання показників якості борошна на кожній системі й розуміння закономірностей їх зміни залежно від перерахованих вище факторів – запорука ефективного управління ходом ведення технологічного процесу розмелювання зерна з метою отримання найкращих результатів помелу, зокрема максимально можливого виходу сортового борошна з високими хлібопекарськими властивостями [6; 7].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Аналіз літературних джерел вказує на відсутність досліджень якості українського борошна, отриманого на заводах малої продуктивності зі скороченою схемою технологічного процесу, з використанням сучасних приладів за міжнародними стандартами.

Мета статті. Метою дослідження є визначення основних показників якості борошна і встановлення закономірності їх зміни на різних етапах технологічного процесу із заводу зі скороченою схемою технологічного процесу.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання:

- дослідити якість потоків борошна з усіх систем технологічного процесу;
- дослідити якість готової продукції, тобто борошна вищого сорту.

Виклад основного матеріалу. Для досягнення зазначеної мети на діючому підприємстві були відібрані зразки борошна з кожної системи технологічного процесу і зразки готової продукції з підприємства із заводу зі скороченою схемою технологічного процесу, розташованого на Півдні України. Схема цього заводу включає:

- чотири драні системи (I- IV др.с.), з яких III і IV драні системи поділяються на крупну і дрібну;
- три сортувальних системи (Сорт1-Сорт3);
- п'ять вимельних систем (Вим1-Вим5);
- дві шліфувальні системи (1 шл.с.-2 шл.с.);
- п'ять розмелювальних систем (1 р.с.-5 р.с.), з яких 1-а і 2-а розмелювальні системи поділяються на крупну і дрібну;
- одна сходовая система (Сх. с.).

Згідно зі схемою технологічного процесу передбачено можливість відбору двох сортів борошна з подальшим їх контролем. Завод може працювати за двома схемами: односортний 72-ти % помел борошна вищого сорту та 75-ти % двосортний помел (55 % – вищого сорту та 20 % – першого сорту). На момент відбору зразків завод працював за схемою односортного помелу.

Зразки були згруповані за якістю на різних етапах технологічного процесу: драні системи першої якості (I+II др.с., III др.кр.с., III др.др.с.), драні системи вимелу (IV др.с.), сортувальні системи першої якості (Сорт.1, Сорт.2), сортувальні системи вимелу (Сорт.3), сходовая система вимелу (Сх.с), шліфувальні системи першої якості (1 шл.с., 2 шл.с.), розмелювальні системи першої якості (1 р.кр.с., 1 р.др.с., 2 р.с., 3 р.с.), розмелювальні системи вимелу (4 р.с., 5 р.с.).

На момент відбору зразків борошна перероблялась помельна партія зерна пшениці II і III класів у співвідношенні 40 % та 60 % врожаю 2018 року з такими показниками: вологість – 12,8 %; склоподібність – 52 %; натура – 770 г/л; кількість клейковини – 21,5 %; якість клейковини – 65 од.

У потоках борошна визначались як основні показники якості, такі як: вологість, білість, зольність, кількість клейковини та її якість, вміст білка, седиментація (за методом Пумпянського) [8], число падіння (ЧП), так і додаткові, які дозволяють більш точно оцінити хлібопекарські властивості: кількість пошкодженого крохмалю (ПК), водопоглинальна здатність (ВПЗ), реологічні властивості та пробна лабораторна випічка.

Вологість борошна визначалась шляхом висушування зразка масою 5 г у сушильній шафі при температурі 130 °С протягом 40 хв згідно з методикою ГОСТ 9404-88, білість

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

борошна – згідно з методикою ГОСТ 26361-84 на приладі РЗ-БЛК, зольність – шляхом прямого згорання в муфельній печі без прискорювача за методикою ГОСТ 27494-87, кількість клейковини – шляхом відмивання тіста, утвореного при змішуванні 25 г борошна з 14 мл води, від крохмалю й оболонки, якість клейковини – на приладі ВДК згідно з методикою ГОСТ 27839-88, вміст білка на ІК-аналізаторі – Інфратек 1241.

Для оцінки білково-протеїназного комплексу використовують показник седиментації, який у багатьох країнах визначається за тестом Зелені, в нашій роботі ми використовували метод Пумпянського [6], що не потребує спеціального обладнання і затрат великої кількості часу, але має подібний результат.

Для оцінки вуглеводно-амілазного комплексу визначали індекс Хагберга (число падіння, ЧП), який характеризує потенційну активність альфа-амілази на приладі «Falling Number». Метод ґрунтується на швидкій клейстеризації водяної суспензії борошна на киплячій водяній бані з подальшим вимірюванням ступеня розрідження крохмального гелю під дією альфа-амілази [9; 10]. Кількість пошкодженого крохмалю визначали на сучасному автоматизованому на приладі SDmatic фірми Chopin Technologies, що відповідає світовим стандартам AFNOR V03-731, AACC 76-33 і ICC 172. Принцип дії приладу базується на амперометричному методі аналізу пошкодженого крохмалю. Він ґрунтується на вимірюванні поглинання молекул йодиду калію в суспензії молекулами пошкодженого крохмалю. Чим сильніше пошкоджений крохмаль, тим більше молекул виробленого йодиду буде поглинено. Прилад створює і вимірює силу електричного струму в суспензії в ході хімічної реакції. Значне падіння сили струму вказує на великий вміст пошкодженого крохмалю. Результати визначень приладу виражаються як AI, % (відсоток поглинання йоду), перетворений у UCD (одиниці Шопен-Дюбуа) [13]. Формули, представлені виробником приладу, можуть бути використані для еквівалентних розрахунків в інших одиницях вимірювання. Водопоглинальну здатність і реологічні властивості тіста визначали на сучасному приладі Міксолаб, який дозволяє одночасно оцінити білково-протеїназний і вуглеводно-амілазний комплекси протягом 45 хв згідно з міжнародним стандартом ICC 173/1. Для комплексної оцінки хлібопекарських властивостей борошна проводили пробне лабораторне випікання формового хліба згідно з методикою ГОСТ 27669-88 в перерахунку на 100 г борошна. Зважаючи на вологість борошна, визначали кількість необхідної води для замісу тіста. Відповідно до рецептури додавали дріжджі (3 г), цукор (4 г) та сіль (1,3 г). Замішування й формування тіста проводилося вручну. Бродіння тіста відбувалось у термостаті при температурі (31±1) °С протягом 180 хв. Хліб випікали в лабораторній печі при температурі 220-230 °С зі зволоженням пекарної камери. Тривалість випікання хліба складала 20-25 хв.

Результати досліджень

Сортові помели пшениці за скороченою схемою технологічного процесу використовують на млинах відносно невеликої продуктивності (100-130 т/доб.), які розташовані в малонаселених центрах. На цих млинах виробляють два або три сорти пшеничного борошна із загальним виходом 72-78 %, які повинні повністю задовольнити потреби місцевого населення [9]. Саме таким є підприємство з Південного регіону України. У табл. 1 наведено результати визначення показників якості потоків борошна з цього підприємства.

Таблиця 1

Показники якості потоків борошна з заводу зі скороченою схемою

Система	Системи якості	Б, од.	Z, %	К, %	ІДК, од.	Р, %	Сед., мл	ЧП, с	UCD, од.	ВПЗ, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
I+II др.с.	I-ї якості	53	0,54	19,5	64	10,2	30	433	15,8	51
III др.кр.с.	I-ї якості	55	0,50	28,0	69	9,2	38	360	16,9	60
III др.др.с.	I-ї якості	51	0,52	23,0	55	8,7	40	405	21,5	56

Закінчення табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
IV др.с.	вимелу	45	0,79	35,6	80	11,8	44	340	26,9	60
Сорт 1	I-ї якості	52	0,50	22,4	53	9,3	33	438	14,9	53
Сорт 2	I-ї якості	52	0,50	27,0	66	10,8	41	411	22,5	57
Сорт 3	вимелу	42	0,82	35,6	86	11,7	43	353	27,8	60
1 шл.с.	I-ї якості	60	0,48	23,8	53	8,9	33	448	16,1	54
2 шл.с.	I-ї якості	58	0,49	28,4	72	10,6	41	382	22,2	58
Сх. с.	вимелу	42	0,62	22,8	80	10,2	30	325	26,3	61
1 р.кр.с.	I-ї якості	64	0,47	25,0	60	10,1	38	423	21,5	55
1 р.др.с.	I-ї якості	68	0,45	24,0	46	9,7	31	429	18,8	56
2 р.с.	I-ї якості	62	0,46	26,0	67	10,2	33	365	24,2	60
3 р.с.	I-ї якості	54	0,54	25,5	64	10,7	28	345	23,6	60
4 р.с.	вимелу	40	0,66	26,7	76	11,5	21	332	22,1	61
5 р.с.	вимелу	20	0,94	33,6	81	12,2	24	262	23,2	66

Примітка: W, % – вологість, Б; од. – білість, Z; % – зольність; К, % – кількість клейковини; ІДК, од. – якість клейковини; Р, % – вміст білка; Сед., мл – седиментація; ЧП, с – число падіння; ВПЗ, % – водопоглинальна здатність; UCD, од. – кількість пошкодженого крохмалю.

Основними технологічними показниками, за якими визначають сорт борошна на борошномельних заводах, є білість та зольність. На драних і сортувальних системах I якості значення білості нижчі на 9-11 од. у порівнянні зі шліфувальними і розмелювальними системами I якості. На системах II якості і вимелу як драного, так і шліфувально-розмелювального процесів значення білості знижується до 20 од (5 р.с.). Оскільки значення зольності обернено пропорційні значенню білості (кореляція становить -0,89), то відповідно найвищі значення зольності спостерігаються на системах II якості й вимелу (0,62-0,94 %).

Основними показниками якості борошна, що оцінюють білково-протеїназний комплекс та характеризують хлібопекарські властивості, є кількість і якість клейковини. Борошно, отримане на різних системах, мало неоднаковий хімічний склад і тому помітно різниться як за кількістю, так і за якістю клейковини. Так, на системах I якості драного й сортувального процесів спостерігались невисокі значення кількості клейковини від 19,5 % (I+II др.с.) до 28,0 % (III др.кр.с.) і від 23,8 % (1 шл.с.) до 28,4 % (2 шл.с.) з досить пружними структурно-механічними властивостями від 53 од. (сорт 1) до 69 од (III др.кр.с.), і від 46 од (1 р.др.с.) до 70 од (2 шл.с.), відповідно. Найвищі значення кількості клейковини з достатньо еластичними властивостями мали системи вимелу (IV др.с., Сорт.3, 5 р.с.) – 33,6-35,6 % за кількістю і від 80 до 86 од. за якістю.

Вміст білка на всіх системах має невисокі значення, що пов'язано з переробкою зерна з невисоким його вмістом. Найменший вміст мали системи першої якості від 8,7 % (III др. др.с.) до 10,7 % (3 р.с.), а найбільший – на системах вимелу від 10,2 % (Сх с.) до 12,2 % (5 р.с.). Такий розподіл вмісту білка за системами властивий і для заводів із розвиненою схемою технологічного процесу [10]. За показником седиментації найкращими хлібопекарськими властивостями володіли зразки борошна з таких систем: III др.др.с., III др.кр.с., Сорт 2, Сорт 3, 2 шл.с. – від 40 до 43 мл.

Число падіння, що характеризує амілолітичну активність борошна, зменшувалось від перших систем до останніх як у драному, так і в розмелювальному процесах. Однак значення числа падіння дещо зависокі, що доводить кліматичний вплив на амілолітичну активність. Так, на системах першої якості драного й сортувального процесів число падіння коливається в межах від 360 с (III др.кр.с.) до 438 с (сорт 1), а на драних системах вимелу – від 340 с (IV др. с.) до 353 с (сорт 3). Найменше значення числа падіння спостерігалось на 5 р.с. – 262 с., що доводить наявність оболонкових частинок зернівки, де найвища амілолітична активність.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

При контролі роботи режимів здрібнювання на борошномельних заводах необхідно слідкувати за значенням пошкодженого крохмалю (ПК) і оптимізувати його, оскільки він може мати як позитивний, так і негативний вплив на хлібопекарські властивості борошна. Низькі значення ПК призводять до низьких значень ВПЗ і низький вихід хліба. Збільшення кількості ПК відповідно збільшує водопоглинальну здатність борошна. Проте надмірно високий рівень ПК веде до формування надто липкого тіста, великого періоду попереднього вистоювання і небажаного потемніння скоринки. Оптимальне значення ПК варіюється залежно від сфери використання борошна, і великою мірою залежить від вмісту білка в борошні, активності альфа-амілази і типу хліба, який випікають з цього борошна. Режимми роботи систем на драному, сортувальному, розмелювально-шліфувальному процесах є різними, внаслідок цього змінюється значення пошкодженого крохмалю. Так, на драних системах показник коливається в межах від 15,8 до 26,9 UCD, на сортувальних системах – від 14,9 UCD до 27,8 UCD, на шліфувальних і на розмелювальних – від 16,1 UCD до 26,3 UCD. Найменше значення ПК мали зразки з I+II др.с. (15,8 UCD), що характерно для перших драних систем, де найменший зазор між вальцевими верстатами. Найбільше значення спостерігалось на третій сортувальній системі – системі вимелу (27,8 UCD), на якій підприємство намагається досягти максимального вилучення борошна.

Значення ПК суттєво впливають на ВПЗ борошна, саме це показує значення водопоглинальної здатності потоків із заводу зі скороченою схемою (кореляційний зв'язок між ВПЗ і ПК дорівнює 0,7). Так, на системах, де вміст ПК найменший, і ВПЗ також є найменшою (I+II др.с.) – 51 %, а на третій сортувальній системі, де вміст ПК найбільший, значення ВПЗ також високе – 60 %. Найвище значення ВПЗ на 5 р.с., хоча і значення ПК оптимальне, але на цій системі найбільший вміст білка (12,2 %) і найбільший вміст оболонкових частинок (зольність – 0,94 %).

За результатами пробного лабораторного випікання, потоки борошна мали невисокі хлібопекарські властивості (рис. 1). На драних і сортувальних системах першої якості об'єм хліба коливався в межах від 380 до 410 см³, на драних і сортувальних системах вимелу – 410 см³, на шліфувальних і розмелювальних системах I від 380–460 см³, що характерно для борошна «середньої» сили [11]. Саме на цих системах спостерігаються найбільший вміст клейковини з помірно еластичними властивостями. Для розмелювальних систем вимелу характерні найгірші показники якості хліба – 350-390 см³, що властиво для «слабкого» борошна.

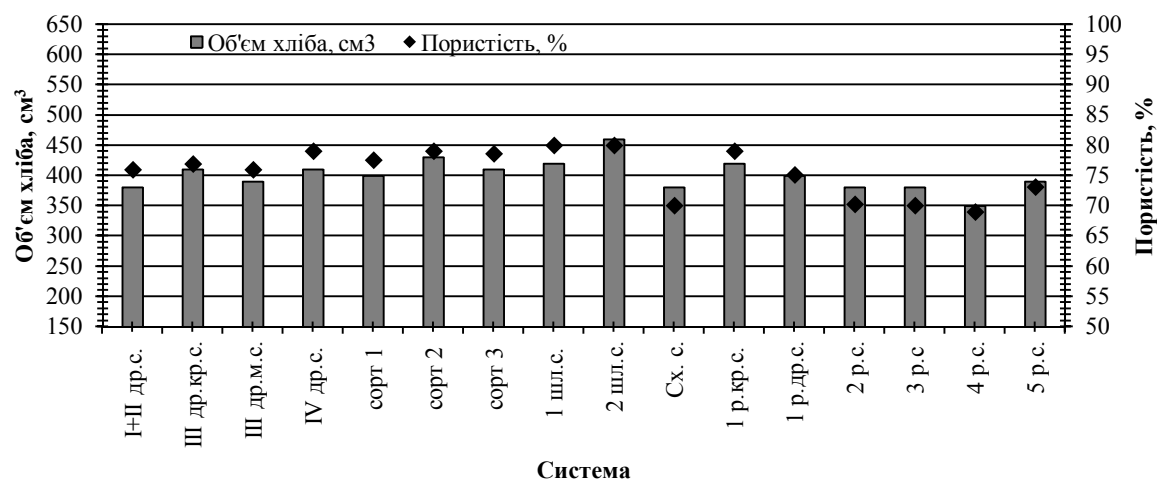


Рис. 1. Показники якості хліба з борошна на різних системах заводу зі скороченою схемою

Реологічні або фізичні властивості тіста, а саме його стійкість до механічного замісу, потребують детального вивчення через те, що від них значною мірою залежать основні результуючі показники хлібопекарської оцінки. Реологічні властивості тіста з усіх зразків борошна були визначені на приладі Міксолаб.

Міксограми зразків борошна із систем першої якості характеризуються низьким індексом ВПЗ (1-3), який залежить, по-перше, від наявності в борошні пентозанів, що містяться в алейроновому шарі й в оболонкових частинах, по-друге, від вмісту білка, чим вище вміст білка, тим вище значення ВПЗ, по-третє, від кількості пошкоджених крохмальних зерен, яка, в свою чергу залежить від режимів роботи вальцьових верстатів, особливо перших шліфувальних та розмелювальних систем. Низький індекс Замісу (1-3), який залежить від поведінки тіста під час замісу та від його стабільності, вказує на низьку стабільність тіста. Високе значення індексу Глютен+ (6-8) свідчить про міцні структурно-механічні властивості клейковини. Індекси В'язкості (6-8), Амлази (6-8) та Ретроградації (6-8) мають високі значення, що характерно для борошна зі слабкою амілолітичною активністю та сильним феноменом клейстеризації крохмалю.

Значення індексів для потоків борошна із систем вимелу мають протилежні значення. Так індекс ВПЗ має високе значення (6-9), що обумовлено наявністю великої кількості оболонкових частинок. Середні індекси Замісу (2-5) та Глютен+ (4-7) вказують на слабкіший клейковинний каркас і низьку стабільність тіста. Для індексів В'язкості (2-4) та Амлази (1-4) характерні невисокі значення, що свідчить про дещо вищу амілолітичну активність у порівнянні із системами першої якості.

Борошно вищого сорту цього заводу відповідає вимогам ГСТУ 46.004-99 «Борошно пшеничне. Технічні умови» і мало такі показники якості: білість – 56 од., зольність – 0,55 %, кількість клейковини – 25,2 %, якість клейковини (ІДК) – 60 од. Зразок мав невисокий вміст білка – 10,9 %, середні значення седиментації – 34 мл, занижену амілолітичну активність (ЧП) – 380 с, оптимальне значення пошкодженого крохмалю – 22,4 UCD та невисоку водопоглинальну здатність – 56 %. Встановлено, що цей зразок борошна мав середні хлібопекарські властивості, що підтверджується невисоким Індексом ВПЗ – 3, низьким Індексом Замісу – 2 та високим Індексом Глютен+ – 8 (рис. 2) та результатами пробної лабораторної випічки хліба: об'єм хліба – 400 см³ з пористістю – 74 %. За органолептичними показниками хліб з даного борошна мав рівномірну але погано забарвлену скоринку з рівномірною пористістю, але з товстостінними порами.



Борошно вищого сорту

Рис. 2. Міксограма борошна вищого сорту

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Висновки відповідно до статті. На заводі зі скороченою схемою технологічного процесу з Південного регіону встановлено, що:

1. На системах першої якості білість борошна вища в 1,5-2,5 рази, зольність нижча в 1,3-1,7 рази, кількість клейковини нижча в 1,1-1,3 рази, значення якості (ІДК) нижчі в 1,1-1,4 рази, значення числа падіння вищі в 1,2-1,3 рази, водопоглинальна здатність нижча в 1,1-1,2 рази в порівнянні з системами вимелу.

2. За показником пошкодженого крохмалю можна робити висновки про режими роботи систем. На цьому заводі встановлено, що в драному процесі режими роботи систем відповідають нормам, про що свідчить найменше значення ПК на I+II др.с. (15,8 UCD), що характерно для перших драних систем, де встановлюється найменший зазор між вальцевими верстатами. Також встановлено, що на сортувальних системах вимелу найбільше значення – 27,8 UCD, на якій підприємство намагається досягти максимального вилучення борошна, що може привести до зниження хлібопекарських властивостей борошна.

3. За результатами пробного лабораторного випікання, потоки борошна мали середні хлібопекарські властивості. На системах першої якості об'єм хліба і пористість були вищими в 1,1-1,2 рази з кращими органолептичними властивостями.

4. Борошно вищого сорту цього заводу відповідає вимогам ГСТУ 46.004-99 «Борошно пшеничне. Технічні умови» і мало такі показники якості: білість – 56 од; зольність – 0,55 %; кількість клейковини – 25,2 %; якість клейковини (ІДК) – 60 од.; вміст білка – 10,9 %; значення седиментації – 34 мл; амілолітична активність (ЧП) – 380 с; значення ПК – 22,4 UCD; ВПЗ – 56 %; об'єм хліба – 400 см³ та пористість – 74 %.

Список використаних джерел

1. Чеботарев О. Н. Технология муки, крупы и комбикормов. Москва: Март, 2004. 688 с.
2. Жигунов Д. А. Хлебопекарные показатели потоков муки при сортовом помоле пшеницы. *Харчова наука і технологія*. 2015. № 4. С. 50–55.
3. Кнопова С. И. Принципы классификации пшеничной муки. *Кондитерское производство*. 2002. № 2. С. 8–9.
4. Казаков Е. Д. Биохимия зерна и хлебопродуктов. Санкт-Петербург: ГИОРД, 2005. 512 с.
5. Егоров Г. А. Управление технологическими свойствами зерна. Воронеж: Наука, 2000. 510 с.
6. Панкратов Г. Н. Научные основы совершенствования технологий мукомольного производства: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.18.01 / Московский государственный университет пищевых производств. Москва, 2001. 20 с.
7. Дудаев В. Г. Создание комплексной системы стабилизации качества. *Хлебопродукты*. 2000. № 9. С. 2–6.
8. Нецветаев, В. П., Лютенко О. В., Пашенко Л. С., Попкова Н. Н. Методы седиментации и оценка качества клейковины мягкой пшеницы. *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки*. 2009. № 2. С. 56–64.
9. Мерко І. Т., Моргун В.О. Наукові основи і технологія переробки зерна. Одеса: Друк, 2001. 348 с.
10. Zhygunov D., Kovalova V., Kovalov M., Donets A. Development of technological solutions for flour production with specified quality parameters. *Food science and technology*. 2018. Vol. 12, Issue 3. P. 71–80.
11. Лебеденко Т. Є., Пшенишнюк Г. Ф., Соколова Н. Ю. Технологія хлібопекарського виробництва. Київ: Освіта України, 2014. 392 с.

References

1. Chebotarev, O. N. (2004). *Tekhnologiiia muku, krupy y kombykormov [Technology of flour, cereals and animal feed]*. Moscow: Mart [in Russian].
2. Zhygunov, D. A. (2015). Khlebopekarnye pokazately potokov muku pry sortovom pomole pshenytsy [Baking indicators of flour flows during wheat varietal milling]. *Kharchova nauka i tekhnolohiia – Food Science and Technology*, 4, 50–55 [in Russian].

3. Knopova, S. I. (2002). Printsipy klassifikatsii pshenichnoi muki [Wheat Flour Classification Principles]. *Kondyterskoe proizvodstvo – Confectionery*, 2, 8-9 [in Russian].
4. Kazakov, E. D. (2005). *Biokhimiia zerna i khlebobproduktov [Biochemistry of grain and bread products]*. St. Petersburg: HYORD [in Russian].
5. Egorov, H. A. (2000). *Upravlenie tekhnologicheskimi svoistvami zerna [Managing the technological properties of grain]*. Voronezh: Nauka [in Russian].
6. Pankratov, H. N. (2001). *Nauchnye osnovy sovershenstvovaniia tekhnologii mukomolnogo proizvodstva [Scientific basis for improving the technology of milling production]* (Doctor's thesis). Moscow State University of Food Production, Moscow [in Russian].
7. Dudaev, V. H. (2000). Sozdanie kompleksnoi sistemy stabilizatsii kachestva [Creating a comprehensive quality stabilization system]. *Khlebobproduktu – Bakery products*, 9, 2–6 [in Russian].
8. Neczvetaev, V. P. (2009). Metody sedymentatsii y ocenka kachestva klejkovyny myagkoj pshenyczy [Sedimentation methods and evaluation of the quality of soft wheat gluten]. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo unyversyteta. Serii: Estestvennye nauky – Scientific statements of Belgorod State University. Series: Natural Sciences*, 2, 56-64 [in Russian].
9. Merko, I. T. (2001). Naukovi osnovy i tekhnolohiia pererobky zerna [Scientific fundamentals and technology of grain processing]. Odesa: Druk [in Ukrainian].
10. Zhygunov, D., Kovalova, V., Kovalov, M., Donetsk, A. (2018). Development of technological solutions for flour production with specified quality parameters. *Food science and technology*, 12 (3), 71-80 [in English].
11. Lebedenko, T. E., Pshenyshniuk, H. F., Sokolova, N. Yu. (2014). Tekhnolohiia khlipopekarskoho vyrobnytstva [Baking production technology]. Kyiv: Osvita Ukrainy [in Ukrainian].

UDC 664.71-11:664.64.016

Dmytro Zhygunov, Vasylyna Kovalova, Mikhailo Kovalov, Olena Korytnyuk

INDICATORS DETERMINATION OF INDIVIDUAL FLOWS QUALITY STREAMS FROM THE PLANT WITH THE REDUCED SCHEME OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS

Urgency of the research. A promising innovation direction of the flour mill industry is the determination of the quality of individual flour streams at a plant with a reduced scheme of the technological process using international standards.

Target setting. The assessment of the quality of individual flour streams in low productivity mills makes it possible to analyze the efficiency of the work and the potential of the enterprise.

Actual scientific researches and issues analysis. Classical works and contemporary publications in domestic and foreign sources relevant to this problem are considered.

Uninvestigated parts of general matters defining. The literature does not contain information on the analysis of the quality indices of individual streams of flour from small mills of Ukraine using international standards.

The research objective. The purpose of the study is to determine the main indicators of flour quality and to determine the regularities of their changes at different stages of the technological process from the plant with the reduced scheme of the technological process.

The statement of basic materials. The article presents the results of the research of quality indicators of flour from different stages of the technological process at the plant with the reduced scheme of the technological process and shows the changes of indicators, depending on the system of technological process. It has been established that flours from first quality systems have the best technological properties, for reduction and sizing systems, the flour whiteness is from 54 units to 68 units, the ash content of these flows is the lowest – from 0.45 % to 0.54 %. The amount of gluten in the break and sorting systems ranges from 19.5 % to 35.6 %, reduction and sizing systems – from 23.8 % to 33.6 %, and the quality of gluten (IDG) has almost the same properties as on reduction and sizing systems, and on break and sorting systems – from 53 unit. up to 86 unit. The indicator of flour sedimentation has high values in break systems, sorting systems – from 38 ml to 44 ml due to the high content of gluten in these systems.

Conclusions. According to the results of the test laboratory baking, flour streams had low baking properties. On the first quality break and sorting systems, bread volume ranged from 380 cm³ to 410 cm³, on break and sorting systems of the tailing systems – 410 cm³, on reduction and sizing systems of the first from 380 to 460 cm³. In the article for the first time an analysis of the amount of damaged starch flour streams with the use of the SDmatic device on a mill with a reduced scheme of the technological process was conducted. Research results can be used by flour-milling plants to stabilize the quality of finished products.

Keywords: flour; technological process; gluten; whiteness; ash content; sedimentation; damaged starch; water absorption capacity.

Fig.: 2. References: 11.

Жигунов Дмитро Олександрович – доктор технічних наук, завідувач кафедри технології переробки зерна, Одеська національна академія харчових технологій (вул. Канатна, 112, Одеса, 65039, Україна).

Zhygunov Dmytro – Doctor of Technical Sciences, Head of Department of Technology of Grain Processing, Odessa National Academy of Food Technologies (112 Kanatna Str., 65039 Odessa, Ukraine).

E-mail: tpz.onaft@gmail.com

Scopus Author ID: 55820666600

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9435-2266>

ResearcherID: D-1372-2015

Ковальова Василина Петрівна – аспірант кафедри технології переробки зерна, Одеська національна академія харчових технологій (вул. Канатна, 112, Одеса, 65039, Україна).

Kovalova Vasylyna – PhD student Technology of Grain Processing, Odessa National Academy of Food Technologies (112 Kanatna Str., 65039 Odessa, Ukraine).

E-mail: k.vasilisa@ukr.net

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2270-1337>

ResearcherID: D-7510-2016

Ковальов Михайло Олександрович – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри технології переробки зерна, Одеська національна академія харчових технологій (вул. Канатна, 112, Одеса, 65039, Україна).

Kovalov Mikhailo – PhD in Technical Sciences, Senior Lecturer of Technology of Grain Processing, Odessa National Academy of Food Technologies (112 Kanatna Str., 65039 Odessa, Ukraine).

E-mail: mak2111@ukr.net

Коритнюк Олена Володимирівна – начальник відділу продажу (Обладнання контролю агропродукції) ТОВ «СокТрейд».

Korytnyuk Olena – Head of sales department (Equipment for agricultural products control) LLC SocTrade.

E-mail: e.korytnyuk@soctrade.in.ua

УДК 504.5:628.33

DOI: 10.25140/2411-5363-2019-1(15)-204-213

Інна Трус, Микола Гомеля, Євгенія Мельниченко, Валерія Мігранова

**ОЧИЩЕННЯ ВОДИ ВІД ІОНІВ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ ВІДСТОЮВАННЯМ,
НАНОФІЛЬТРУВАННЯМ ТА ФЛОТАЦІЄЮ**

Актуальність теми дослідження. Проблема погіршення екологічної ситуації стає все більш актуальною. Тому пріоритетним напрямком є розробка ефективних методів очищення води від іонів важких металів.

Постановка проблеми. Нині наявні методи вилучення іонів важких металів із водних розчинів придатні переважно для очищення промислових стічних вод і мало ефективні для очищення природних вод, які містять у високих концентраціях іони кальцію і магнію, які суттєво знижують ємність іонітів по йонах важких металів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Були розглянуті останні публікації у відкритому доступі, включаючи літературу про основні методи очищення та доочищення води від іонів важких металів.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Інформація про ефективність очищення природних вод, які містять у високих концентраціях іони кальцію і магнію.

Постановка завдання. Вивчення ефективності видалення іонів міді та свинцю із розведених водних розчинів при використанні фероціаніду калію та флокулянтів при відстоюванні, фільтруванні на фільтрі «синя стрічка», на нанофільтраційній мембрані ОПМН-П та методом флоатації.

Виклад основного матеріалу. Досліджено процеси очищення води від важких металів при їх висадженні фероціанідом калію. Показано, що при очищенні води від іонів міді та свинцю шляхом комплексоутворення з ціанофератом калію при використанні нанофільтрування після відстоювання та механічного фільтрування ефективність вилучення іонів важких металів зростає. Вивчено ефективність зв'язування ціаноферату калію та іонів міді при взаємодії з полікатіонними флокулянтами.

Висновки відповідно до статті. Наведено результати досліджень з вилучення іонів важких металів (на прикладі міді та свинцю), отримані при переведенні важких металів у нерозчинний стан зв'язуванням у фероціанідні комплекси їх відстоюванням та доочищенням методами фільтрування та нанофільтрування. Показано, що застосування нанофільтрування дозволяє підвищити на 4–15 % ступінь очищення води від іонів міді та свинцю. Високу ефективність очищення води від важких металів забезпечив метод флоатації.

Ключові слова: важкі метали; флокулянти; фероціанід калію; нанофільтрування; комплексоутворення; флоатація.

Рис.: 8. Бібл.: 16.

Актуальність теми дослідження. Головними джерелами надходження важких металів у навколишнє природне середовище є природні та антропогенні джерела [1]. Природні джерела – виверження вулканів, тектонічні розломи, геохімічні аномалії і до сьогодні є пониженим джерелом надходження важких металів у довкілля. Вони великою мірою забезпечують наявність важких металів у підземних водах, включаючи і артезіанські води, запаси яких сформувались мільйони років тому. Проте на сьогодні антропогенні джерела надходження важких металів за своєю поширеністю наближаються до природних, а у багатьох випадках і переважають їх.

Постановка проблеми. Найбільш небезпечним є накопичення важких металів у донних відкладах поверхневих водойм [2]. Здебільшого вміст металів у донних відкладах державними службами моніторингу не контролюється, відсутні нормативи допустимих концентрацій важких металів у донних відкладах. Водночас при евтрофікації водойм, за рахунок міграції важких металів у гідробіонтах, їх концентрації у поверхневих водах можуть дуже зростати. Через низьку ефективність очисних споруд на станціях водопідготовки дані токсиканти можуть попадати в питну воду, створюючи пряму загрозу здоров'ю людей. У зв'язку з цим пошук ефективних методів очищення та доочищення води є особливо актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. До методів очищення води від іонів важких металів можна віднести реагентні [3; 4], мембранні, електрохімічні [5; 6], іонообмінні [7; 8], сорбційні [9] та біологічні методи [10; 11]. Більшість із згаданих методів мають недостатню ефективність вилучення металів із води. Сорбційні, біологічні та реагентні методи не дозволяють вилучати важкі метали для повторного використання і супроводжуються їх втратами в процесі очищення з осадами. Методи іонного обміну дозволяють ефективно вилучати важкі метали з води і в сукупності з електроекстракцією отримувати цінні компоненти, які придатні для повторного використання [11; 12].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Зазначені методи придатні переважно для очищення промислових стічних вод і мало ефективні для очищення природних вод, які містять у високих концентраціях йони кальцію і магнію, які суттєво знижують ємність іонітів по йонах важких металів. Тому розробка ефективних методів вилучення важких металів із води в присутності йонів жорсткості є актуальною проблемою. Традиційний реагентний метод очистки стічних вод від йонів важких металів оснований на використанні сульфідів натрію не набув широкого використання через значний гідроліз сульфідів у воді, забруднення її сірководнем та через недостатню ефективність. З іншого боку, відомо, що фероціаніди важких металів мають дуже низьку розчинність, що сприяє їх ефективному видаленню із води [13]. Цей підхід був використаний у представленій роботі.

Постановка завдання. Метою цієї роботи було визначення ефективності видалення йонів міді та свинцю із розведених водних розчинів при використанні фероціаніду калію та флокулянтів при відстоюванні, фільтруванні на фільтрі «синя стрічка», на нанофільтраційній мембрані ОПМН-П та методом флотації.

Для досягнення поставленої мети вирішували такі завдання:

- вивчити процеси осадження йонів важких металів фероціанідом калію залежно від співвідношення реагентів та реакції середовища;
- вивчити вплив полікатіонних флокулянтів на ефективність вилучення з води фероціанідів важких металів;
- оцінити вплив процесів фільтрування, нанофільтрування а флотації на ефективність доочищення води при використанні флокулянтів та фероціаніду калію.

Експериментальна частина

Як модельні використовували розчини сульфату міді (II) та свинцю (II) з концентрацією 3–5 мг/дм³, що були отримані як на дистильованій, так і водопровідній воді. Ціаноферат калію використовували в концентраціях від 1 до 15 мг/дм³, полікатіонні флокулянти додавали в концентраціях від 1 до 10 мг/дм³. Як флокулянти використовували Акватон-10, Zetag-7547, Magnefloc-5250L, Magnefloc-368 та Praestol.

Після додавання реагентів модельні розчини інтенсивно перемішували 10 хвилин, а потім відстоювали 3 години. Розчини фільтрували на фільтрах із синьою стрічкою і визначали залишкові концентрації металів. В окремих дослідах коригували рН середовища. У багатьох дослідах після фільтрування розчинів на фільтрі із синьою стрічкою та визначення вмісту металів їх доочищали на нанофільтраційній мембрані методом тупикового фільтрування. Метали визначали у воді за допомогою фотоколориметричного методу [14] та методу інверсійної вольтамперометрії [15].

У випадку використання флотації після додавання реагентів розчин відстоювали 3 години, потім проводили флотацію 20 хвилин, відділяючи піну. Воду фільтрували на фільтрі синя стрічка.

Ступінь очищення води від металу розраховували за формулою:

$$Z = \left(1 - \frac{C_3}{C_0}\right) \cdot 100, \% \quad (1)$$

де C_3 – залишкова концентрація металу в розчині; C_0 – вихідна концентрація металу в розчині.

Виклад основного матеріалу. У роботі використовували йони важких металів у відносно низьких концентраціях, оскільки одним із завдань було визначення умов ефективного видалення йонів важких металів із води та визначення рівня їх залишкових концентрацій у воді.

Як видно з рис. 1 ефективність вилучення йонів міді з води залежить не лише від співвідношення концентрацій метал-фероціанід, але і від рН середовища. Ефективність очищення зростала як при підвищенні дози фероціаніду, так і при зростанні рН середовища.

Це цілком закономірно, тому що глибина конверсії вихідних речовин, зазвичай, зростає із підвищенням концентрацій компонентів, а фероціаніди металів більш стійкі при $pH > 8$.

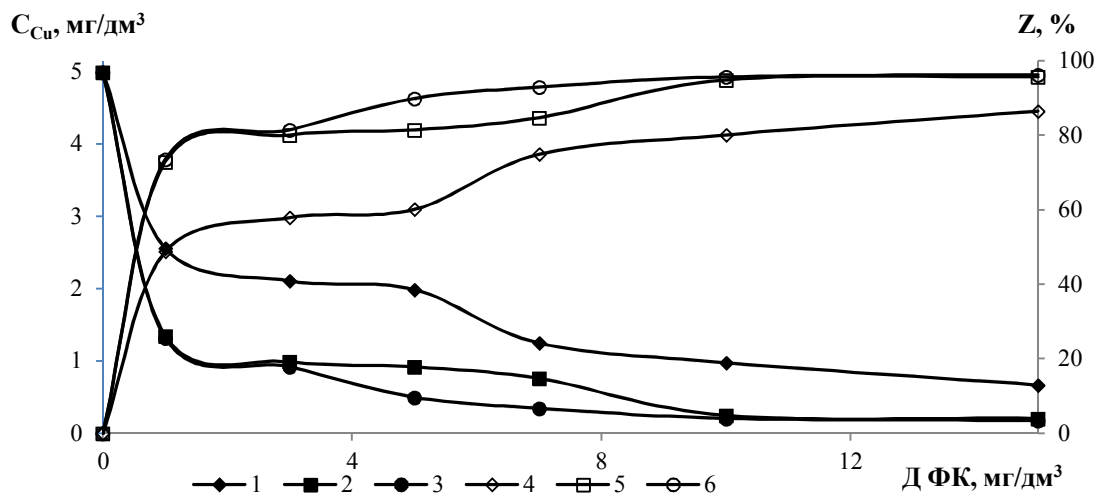


Рис. 1. Залежність залишкової концентрації йонів міді в розчині в дистильованій воді (1; 2; 3) та ступеню очищення води від міді (4; 5; 6) від дози фероціаніду калію при pH розчину 5,1 (1; 4), 8,1 (2; 5) та 9,1 (3; 6) після відстоювання та фільтрування

Разом з тим треба зауважити, що залишкові концентрації міді ($\approx 0,18\text{--}0,21$ мг/дм³) навіть у кращих дослідах значно переважають розчинність ціаноферату у воді. Скоріш за все вони здатні утворювати стійкі колоїдні системи у воді, і тому не відділяються із води ні відстоюванням, ні фільтруванням. У водопровідній воді (рис. 2), де рівень pH був досить високим – 8,1 та 9,1, ефективність очищення води від міді була навіть нижчою, ніж розчинів у дистильованій воді. Можливо в цьому випадку також значна кількість ціаноферату міді існує у вигляді стійких колоїдних систем.

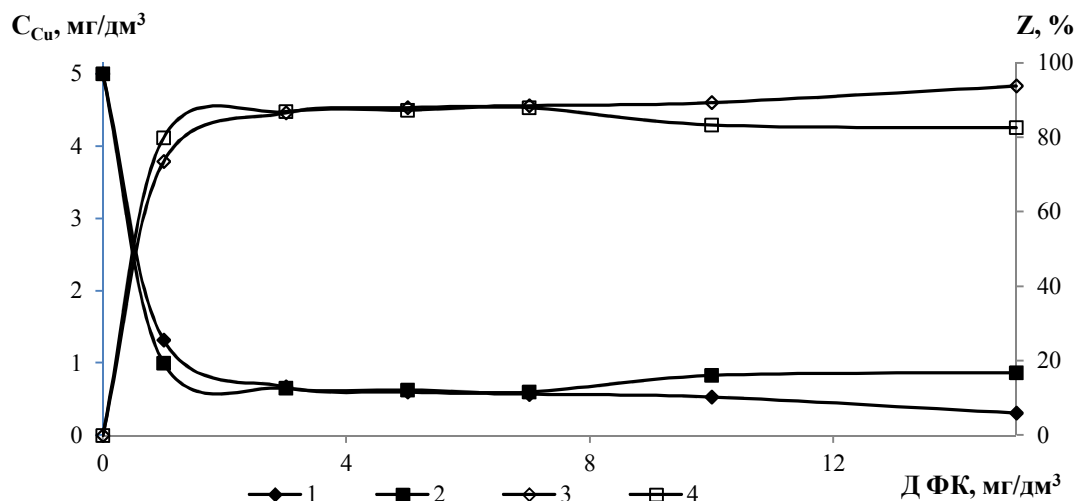


Рис. 2. Залежність залишкової концентрації йонів міді у водопровідній воді (1; 2) та ступеню вилучення йонів міді (3; 4) від дози фероціаніду калію при pH : 8,1 (1; 3), та 9,1 (2; 4) після відстоювання та фільтрування

Для підвищення ефективності очищення води, в разі присутності стійких колоїдних систем, доцільно використовувати метод нанофільтрування, який забезпечує практично повне вилучення колоїдних часток із води. Тому для підвищення ефективності очищення води була використана нанофільтраційна мембрана для доочищення води. Як видно з рис. 3 та 4, при застосуванні нанофільтрування ефективність вилучення міді та свинцю

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

виросла на 4–15 % у порівнянні зі звичайним фільтруванням. Особливо суттєво підвищилась ефективність очищення води при відносно невеликих дозах ціаноферату калію – 1–5 мг/дм³. Проте повного видалення міді було досягнуто лише при концентрації фероціаніду калію на рівні 15 мг/дм³. Для свинцю залишкові концентрації було знижено лише до 0,12–0,15 мг/дм³. Це говорить про те, що дійсно частина металів залишалась у воді у вигляді стійких колоїдів. Але певна частина іонів свинцю та міді залишалась у вигляді іонів або гідроксидів металів. У водопровідній воді ця кількість не зв'язаних іонів міді була більшою, ніж у дистильованій воді. Можливо в цьому випадку конкурентами йонам міді були йони жорсткості, концентрація яких у водопровідній воді була значно вищою за концентрацію важких металів. При жорсткості води 4–5 мг-екв/дм³ концентрації іонів жорсткості переважали вміст іонів міді в мг-екв/дм³ у 25–32 рази.

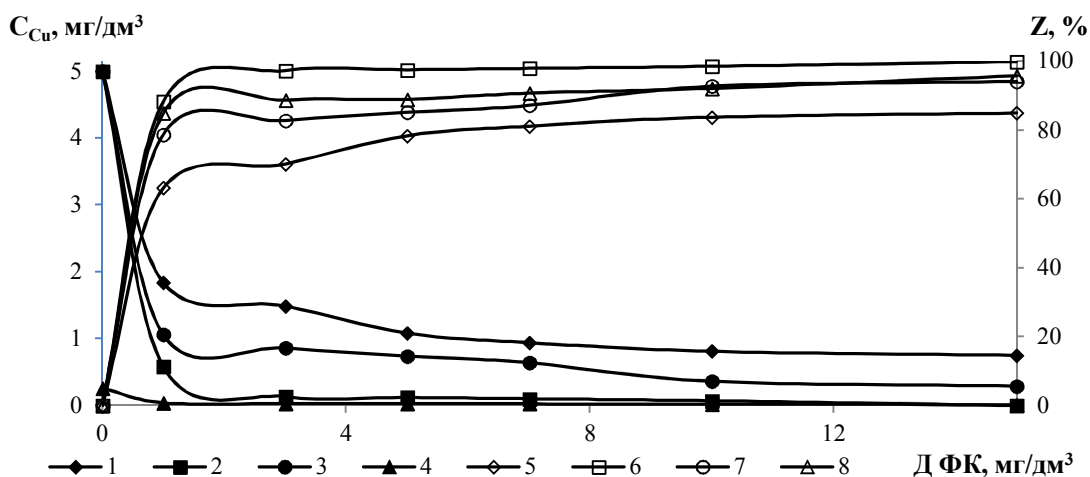


Рис. 3. Залежність концентрації іонів міді (1; 2; 3; 4) та ступеня їх вилучення (5; 6; 7; 8) з дистильованої (1; 2; 5; 7) та водопровідної (3; 4; 6; 8) води від дози фероціаніду калію при доочищенні води фільтруванням (1; 3; 5; 6) та фільтруванні й нанофільтрації (2; 4; 7; 8)

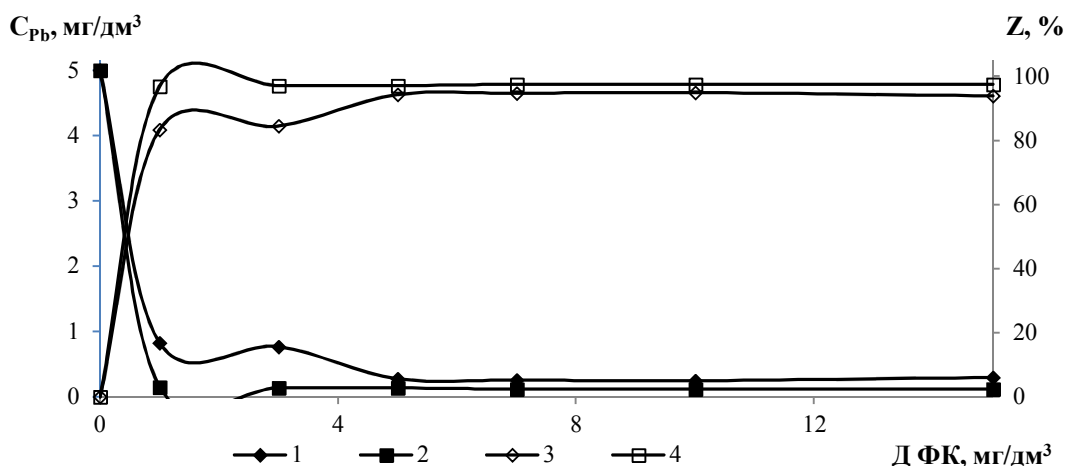


Рис. 4. Залежність концентрації іонів свинцю у дистильованій воді (1; 2) та ступеню їх вилучення з води (3; 4) від дози фероціаніду калію при доочищенні води фільтруванням на фільтрі синя стрічка (1; 3) та фільтруванні на фільтрі «синя стрічка» та нанофільтраційній мембрані ОПМН-П (2; 4)

Для підвищення ефективності вилучення з води ціанофератів важких металів доцільно було застосувати полікатіонні флокулянти, які утворюють комплексні сполуки великої молекулярної маси з ціанофератами. Для зв'язування ціанофератів нами були

використанні флокулянти Акватон-10, Zetag-7547, Magnefloc-5250L, Magnefloc-368 та Praestol (рис. 5). Як видно з рис. 5, краще фероціанід зв'язували флокулянти Акватон-10 та Zetag-7547. А в присутності йонів міді (рис. 6) кращий результат забезпечив флокулянт Zetag-7547, який при звичайному відстоюванні забезпечив зниження концентрації міді до 0,16–0,22 мг/дм³ при повному вилученні фероціаніду.

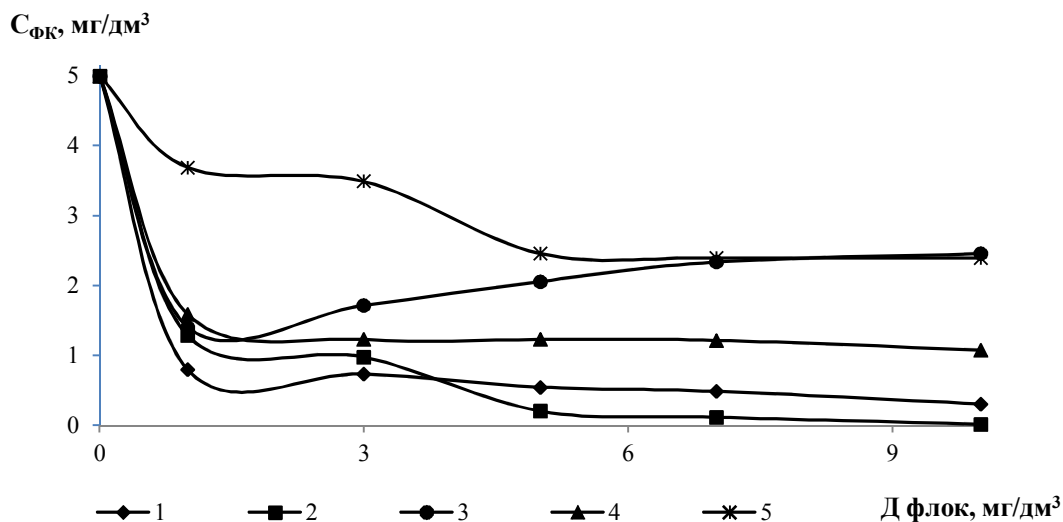


Рис. 5. Залежність залишкової концентрації фероціаніду калію (1; 2; 3; 4; 5) у розчині дистильованої води при початковій концентрації 5 мг/дм³ від дози флокулянту Акватон 10 (1), Magnefloc-368 (2), Magnefloc-52504 (3), Zetag-7547 (4), Praestol (5) після відстоювання протягом 24 годин та фільтруванні через фільтр «синя стрічка»

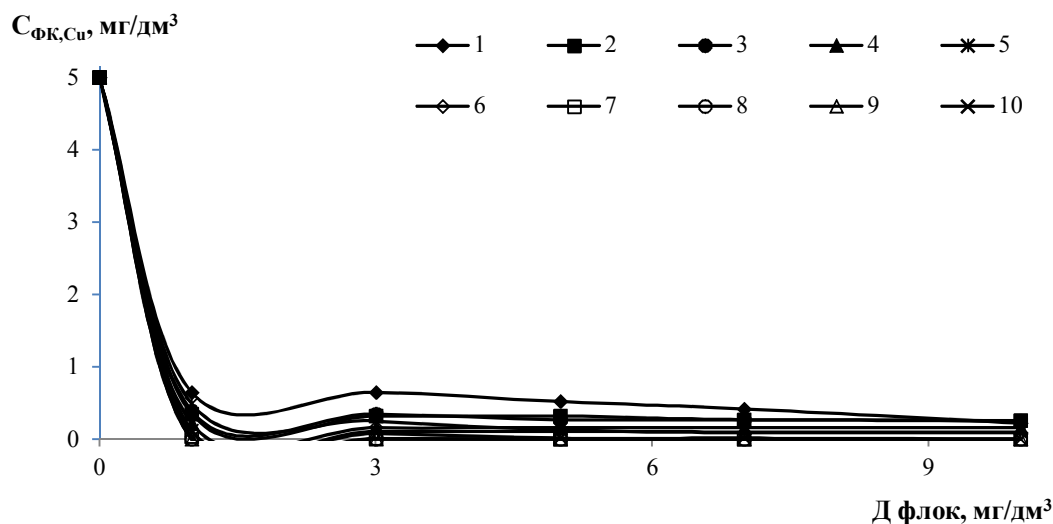


Рис. 6. Залежність залишкової концентрації іонів міді (1; 2; 3; 4; 5) та фероціаніду калію (6; 7; 8; 9; 10) від дози флокулянту (1, 6 – Акватон, 2; 7 – Magnefloc-368, 3; 8 – Magnefloc-52504, 4; 9 – Zetag-7547, 5; 10 – Praestol) після відстоювання та фільтрування

При використанні ціаноферату калію та флокулянту Zetag-7547 при нанофільтруванні було досягнуто залишкових концентрацій міді при дозі флокулянту 3 мг/дм³ а дозах ціаноферату калію 3 – 15 мг/дм³ на рівні 0,0 – 0,04 мг/дм³. Ступінь очищення міді при цьому сягав 99,2 – 100,0% (рис. 7).

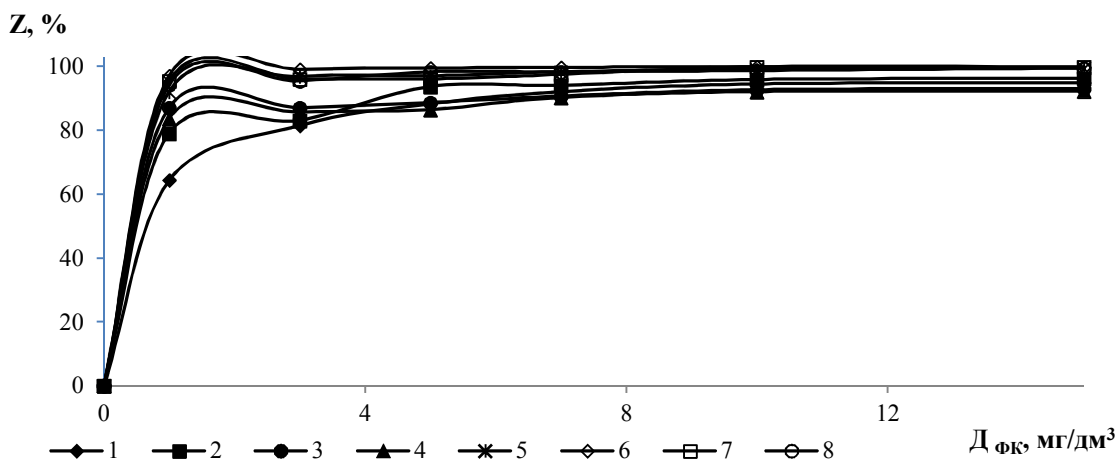


Рис. 7. Залежність ступеню вилучення іонів міді з дистильованої води (1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8) від дози фероціаніду калію при доочищенні води фільтруванням (1-4) та фільтруванням і нанофільтрацією (5-8) при дозах флокулянту Zetag-7547, мг/дм³: 1 – (1; 5); 3 – (2; 6); 5 – (3; 7); 10 – (4; 8)

Відомо, що комплекси полікатіонітів із аніонними ПАР застосовують для вилучення йонів металів із води методом флотації [16]. При вилученні йонів свинцю та міді методом флотації при використанні катіонних флокулянтів та аніонного ПАР сульфонол НП-3, кращі результати отримано при вилученні йонів міді. Іони свинцю не утворюють комплексів із катіонними флокулянтами, тому ефективність їхнього вилучення з води була низькою. В основному процес очищення відбувався за рахунок утворення сполук свинцю із сульфонолом. Ступінь переходу розчину в піну зростав із дозою сульфонолу в межах від 1,5 – 7,2 %.

Треба зазначити, що суттєвою перевагою методу флотації є доцільність його застосування при очищенні вод забруднених маслами, нафтопродуктами, поверхнево-активними речовинами. Суттєво кращих результатів при очищенні води від йонів важких металів методом пневматичної флотації було досягнуто при використанні разом із катіонними флокулянтами, сульфонолом НП-3, фероціаніду калію (рис. 8). У кращих співвідношеннях реагентів досягнуто ступеню вилучення міді на рівні 97,5–98,4 %, при вилученні свинцю – 95,4–98,0 %, при вихідних концентраціях металів 10 мг/дм³. При концентрації міді 3–5 мг/дм³ залишкові концентрації металу були знижені до 0,02–0,07 мг/дм³ при ступенях вилучення 96,66–99,40 %.

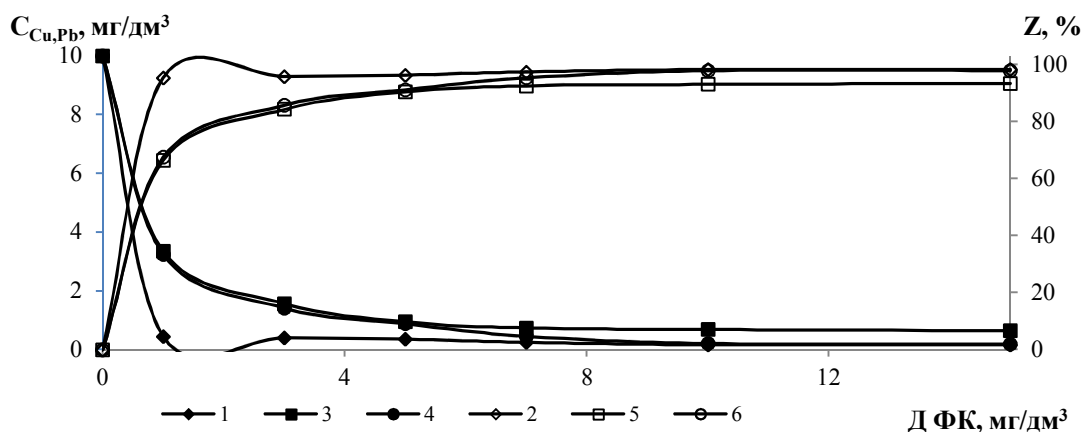


Рис. 8. Залежність залишкової концентрації міді (1) та ступеня їх вилучення (2), йонів свинцю (3) та ступеню їх вилучення (4) від дози фероціаніду калію при очищенні води напірною флотацією при дозі флокулянту Акватон 10 мг/дм³ (1; 2) та флокулянту Zetag-7547 1 (3; 5) та 3 (4; 6) мг/дм³ при витраті сульфонолу НП-3 20 мг/дм³

Таким чином, при очищенні від іонів міді та свинцю із застосуванням ціанофератних комплексів природних вод із низькою каламутністю доцільно використовувати відстоювання, механічне фільтрування та нанофільтрацію, а стічних вод, забруднених механічними домішками – флоатацією та механічне фільтрування.

Висновки відповідно до статті.

1. Досліджено процеси очищення води від важких металів при їх висадженні фероціанідом калію. Показано, що ефективність очищення зростає при збільшенні дози ціаноферату калію та при підвищенні рН середовища до 8,0 – 9,1.

2. Показано, що при очищенні води від іонів міді та свинцю шляхом комплексоутворення з ціанофератом калію при використанні нанофільтрування після відстоювання та механічного фільтрування ефективність очищення вилучення іонів важких металів зростає на 4–15 %. Більший ефект спостерігається при дозах ціаноферату калію до 7 мг/дм³.

3. Визначено ефективність зв'язування ціаноферату калію та іонів міді при взаємодії з полікатіонними флокулянтами. Застосування флокулянтів забезпечує підвищення ефективності очищення води відстоюванням та механічним фільтруванням. При доочищенні води нанофільтруванням ступінь вилучення міді становить 97,2–100,0 %.

4. Показано, що при використанні катіонних флокулянтів та аніонного ПАР (сульфонол НП-3) у процесі очищення води від іонів важких металів методом пневматичної флоатації досягнуто ступінь очищення води від міді 93–95 % та від свинцю 21–57 %. Низький ступінь вилучення свинцю обумовлений низькою здатністю свинцю до утворення комплексів із катіонними флокулянтами.

5. Встановлено, що при використанні для зв'язування іонів важких металів разом із ціанофератом калію, катіонних флокулянтів та при застосуванні для піноутворення сульфонолу НП-3 досягнуто високої ефективності вилучення металів із води. Ступінь вилучення металів зростає із підвищенням дози ціаноферату при зниженні концентрації металу у воді. Концентрацію міді було знижено до 0,02–0,1 мг/дм³, та свинцю – до 0,21 мг/дм³ при дозах ціаноферату 10–15 мг/дм³.

Список використаних джерел

1. Линник П. Н., Набиванец Б. И. Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах. Ленинград: Гидрометеиздат, 1986. 267 с.
2. Трохименко Г. Г., Цепанюк Н. В. Визначення ступеня кумуляції важких металів у гідробіонтах узького лиману. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування*. 2015. № 4. С. 98–105.
3. Серпокрьолов Н. С., Вильсон Е. В., Гетманцев С. В., Марочкин А. А. Экология очистки сточных вод физико-химическими методами. Москва: Изд-во АСВ, 2009. 261 с.
4. Novel adsorbent based on silkworm chrysalides for removal of heavy metals from wastewaters / Paulino A. T. et al. *J Colloid Interf Sci*. 2006. Vol. 301. P. 479–487.
5. Heavy metal ions removal from metal plating wastewater using electrocoagulation: Kinetic study and process performance / M. Al-Shanag et al. *Chem Eng J*. 2015. Vol. 260. P. 749–756.
6. Arbabi M., Hemati S., Amiri M. Removal of lead ions from industrial wastewater: A review of removal methods. *International Journal of Epidemiologic Research*. 2015. Vol. 2(2). P. 105–109.
7. Гомеля М. Электроэкстракция тяжелых металлов из сточных вод для защиты природных водоемов от загрязнения. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2018. Т. 1, № 10. С. 55–61.
8. Гомеля М., Иванова В., Трус І. Ефективність вилучення іонів важких металів з розведених розчинів іонообмінним методом. *Технічні науки та технології*. 2017. № 4 (10). С. 154–162.
9. Ковальчук А., Почечун Т., Галиш В., Трус І. Фосфорилування шкаралуп волоських горіхів для підвищення ефективності очищення водних розчинів. *Технічні науки та технології*. 2018. № 2(12). С. 236–244.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

10. Филатова Е. Г. Обзор технологий очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов, основанных на физико-химических процессах. *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2015. № 2 (13). С. 97–109.
11. Strategies based on silica monoliths for removing pollutants from wastewater effluents: A review / D. Rodrigues et al. *Science of The Total Environment*. 2013. Vol. 461–462, № 9. P. 126–138.
12. Nevenka R. Removal of nickel (II) ions from aqueous solutions using the natural clinoptilolite and preparation of nano-NiO on the exhausted clinoptilolite / R. Nevenka, et al. *Applied Surface Science*. 2010. Vol. 257, I. 5. P. 1524–1532.
13. Терещенко О. М., Мельниченко Є. В., Макаренко І. М. Очистка стічних вод від іонів міді методом комплексоутворення та ультрафільтрації. *Збірник наукових праць НУК*. 2017. № 2. С. 93–97.
14. Лурье Ю. Ю. Справочник по аналитической химии. 5-е изд. Москва: Химия, 1979. 480 с.
15. Определение тяжелых металлов в водных экосистемах методом инверсионной хронопотенциометрии / Суровцев И. В. и др. *Химия и технология воды*. 2009. Т. 31. № 6. С. 677–687.
16. Гомеля М. Д., Терещенко О. М. Використання комплексів катіонних полімерів з фероціанідом калію при очищенні води від радіоізотопів цезію-137 методом пневматичної флоатації. *Перспективные направления развития экологии, экономики, энергетики: сборник научных статей. ОЦНТЭИ. Одесса, 1999. С. 333–338.*

References

1. Linnik, P. N., Nabivanets, B. I. (1986). *Formy migratsii metallov v presnykh poverkhnostnykh vodakh [Forms of metal migration in fresh surface waters]*. Leningrad: Gidrometeoizdat [In Russian].
2. Trokhymenko, G. G., & Tsyhanyuk, N. V. (2015). Vznachennia stupenia kumulatsii vazhkykh metaliv u hidrobiontakh uzкого lymanu [Determination of the degree of cumulation of heavy metals in hydrobionts of a narrow estuary]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK – Collection of scientific works of the National University of Shipbuilding*, 4, 98–105 [in Ukrainian].
3. Serpokrylov, N. S. (2009). *Ekologiya ochistki stochnykh vod fiziko-khimicheskimi metodami [Ecology of wastewater treatment by physicochemical methods]*. Moscow: DIA Assotsiastiiia stroitelnykh vuzov [In Russian].
4. Paulino, A. T. et al. (2006). Novel adsorbent based on silkworm chrysalides for removal of heavy metals from wastewaters. *Journal of colloid and interface science*, 301(2), 479–487.
5. Al-Shannag, M., et al. (2015). Heavy metal ions removal from metal plating wastewater using electrocoagulation: Kinetic study and process performance. *Chemical Engineering Journal*, 260, 749–756.
6. Arbabi, M., et al. (2015). Removal of lead ions from industrial wastewater: A review of Removal methods. *International Journal of Epidemiologic Research*, 2(2), 105–109.
7. Gomelya, M. (2018). Elektroekstraktsiia tiazhelykh metallov iz stochnykh vod dlia zashhity prirodnykh vodoemov ot zagriaznenniia [Electroextraction of heavy metals from wastewater to protect natural water bodies from pollution]. *Vostochno-Evropejskii zhurnal peredovykh tekhnologii – East European Advanced Technology Journal*, 1(10), 55–61.
8. Gomelya, M., Ivanova, V., Trus, I. (2017). Efektivnist viluchennya ioniv vazhkykh metaliv z rozvedenix rozchiniv ionoobminnim metodom [Efficiency of extraction of heavy metal ions from diluted solutions by ion-exchange method]. *Tekhnichni nauki ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, 4 (10), 154–162 [in Ukrainian].
9. Kovalchuk, A. I., Pochechun, T., Halish, V., Trus, I. (2018). Fosforiliuvannia shkaralup voloskikh horikhiv dlia pidvishhennia efektyvnosti ochishhennia vodnykh rozchiniv [Phosphorization of shells of walnuts to improve the efficiency of purification of aqueous solutions]. *Tekhnichni nauki ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, 2 (12), 236–244 [in Ukrainian].
10. Filatova, E. G. (2015). Obzor tekhnologii ochistki stochnykh vod ot ionov tiazhelykh metallov, osnovannykh na fiziko-khimicheskikh protsessax [Review of wastewater treatment technologies for heavy metal ions based on physicochemical processes]. *Izvestiia vuzov. Prikladnaia khimiia i biotekhnologiya – News of universities. Applied chemistry and biotechnology*, 2 (13). 97–109 [In Russian].
11. Rodrigues, D., Rocha-Santos, T. A. P., Freitas, A. C., A. Gomes, M. P., Duarte, A. C. (2013). Strategies based on silica monoliths for removing pollutants from wastewater effluents: A review. *Science of the Total Environment*, 461, 126–138.

12. Nevenka, R., Stojakovic, D., Jovanovic, M., Zabukovec, N., Mazaj, M., Kaucic, V. (2010). Removal of nickel (II) ions from aqueous solutions using the natural clinoptilolite and preparation of nano-NiO on the exhausted clinoptilolite. *Applied Surface Science*, 257(5), 1524–1532.
13. Tereshchenko, O. M., Melnychenko, Ye. V., Makarenko, I. M. (2017). Ochistka stichnikh vod vid ioniv midi metodom kompleksoutvorennya ta ultrafiltratsii [Purification of sewage from copper ions by the method of complex formation and ultrafiltration]. *Zbirnik naukovix prac NUK – Collection of scientific works of NUS*, 2, 93–97 [in Ukrainian].
14. Lure, Yu. Yu. (1979). *Spravochnik po analiticheskoi khimii [Handbook of Analytical Chemistry]*. Moscow: Khimiia [In Russian].
15. Surovcev, I. V. et. al. (2009). Opredelenie tiazhelykh metallov v vodnykh ekosistemakh metodom inversionnoi khronopotentsiometrii [Determination of heavy metals in aquatic ecosystems by the method of inversion chronopotentiometry]. *Khimiia i tekhnologiya vody – Water Chemistry and Technology*, 31(6), 677–687 [in Russian].
16. Gomelya, M. D., Tereshhenko, O. M. (1999). Vykorystannia kompleksiv kationnikh polimeriv z ferotsianidom kaliu pri ochistsi vodi vid radioizotopiv tseziuu-137 metodom pnevmatichnoi flotatsii [Use of complexes of cationic polymers with potassium ferrocyanide during water purification from radioisotopes of cesium-137 by pneumatic flotation]. *Perspektivnye napravleniya razvitiya ekologii, ekonomiki, energetiki – Perspective directions of development of ecology, economy, energy*. Odessa. 333–338 [in Ukrainian].

UDC 504.5:628.33

Inna Trus, Nikolai Gomelya, Yevheniia Melnychenko, Valeriia Mihranova

WATER PURIFICATION FROM HEAVY METAL IONS USING SEDIMENTATION, NANOFILTRATION AND FLOTATION

Urgency of the research. The problem of a declining ecological situation is becoming more and more relevant. Thus, the priority direction is the development of effective methods which can be used in water purification from heavy metal ions.

Target setting. To date, existing methods of the removal of heavy metal ions from water solutions are suitable mainly for the treatment of industrial wastewater and are not efficient for the purification of natural waters containing high concentrations of calcium and magnesium ions, which significantly reduce the capacity of ion exchangers regarding the heavy metal ions.

Actual scientific researches and issues analysis. Recent publications in open access were taken into consideration, including literature on the main methods of purification and after-treatment of water from heavy metal ions.

Uninvestigated parts of general matters defining. Information on the purification effectiveness of natural water containing high concentrations of calcium and magnesium ions.

The research objective. We also carried out a study of the copper and lead ions removal efficiency from dilute aqueous solutions using potassium ferrocyanide and flocculants within the methods of settling, flotation, filtration on a blue tape filter and on the OPMN-P nanofiltration membrane.

The statement of basic materials. The processes of water purification from heavy metals during their sedimentation using potassium ferrocyanide are investigated. It has been shown that when purifying water from copper and lead ions by chelation method with potassium ferricyanide using nanofiltration after settling and mechanical filtration, the efficiency of the removal of heavy metal ions increases. The efficiency of binding between potassium ferricyanide and copper ions in interaction with polycationic flocculants was studied.

Conclusions. The results of investigations on the extraction of heavy metal ions (for example, copper and lead) are derived from heavy metals in solubilization by binding to ferrocyanide complexes with their subsequent sedimentation and purification using filtration and nanofiltration methods. It is shown that the application of nanofiltration can increase the rate of water purification from copper and lead ions by 4 - 15%. The high efficiency of water purification from heavy metals was provided by the method of flotation.

Keywords: heavy metal; flocculants; potassium ferrocyanide; nanofiltration; chelation; flotation.

Fig.: 8. References: 16.

Трус Інна Миколаївна – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри екології та технології рослинних полімерів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна).

Trus Inna – PhD in Technical Sciences, Senior Lecturer of Department of ecology and technology of plant polymers, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (37 Peremohy Av., 03056 Kyiv, Ukraine).

E-mail: inna.trus.m@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6368-6933>

ResearcherID: I-3204-2017

Scopus Author ID: 56152219600

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Гомеля Микола Дмитрович – доктор технічних наук, професор, завідуючий кафедрою екології та технології рослинних полімерів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна).

Gomelya Nikolai – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of ecology and technology of plant polymers, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (7 Peremohy Av., 03056 Kyiv, Ukraine).

E-mail: m.gomelya@kpi.ua

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1165-7545>

Scopus Author ID: 6507653734

Мельниченко Євгенія Володимирівна – молодший науковий співробітник кафедри екології та технології рослинних полімерів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна).

Melnychenko Yevheniia – Junior Researcher of Department of ecology and technology of plant polymers, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (7 Peremohy Av., 03056 Kyiv, Ukraine).

E-mail: jenny_666@live.ru

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0363-6824>

Мігранова Валерія Олегівна – студент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна).

Mihranova Valeriia – student, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (7 Peremohy Av., 03056 Kyiv, Ukraine).

УДК 005.336.3:687.268.1

DOI: 10.25140/2411-5363-2019-1(15)-214-226

*Галина Михайлова, Валентина Осієвська, Світлана Галько, Галина Озимок***ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ТА БЕЗПЕЧНОСТІ МАТЕРІАЛІВ НАПОВНЮВАЧІВ
ТА ЧОХЛІВ ПОДУШОК ДЛЯ СНУ**

Актуальність теми дослідження. Подушки забезпечують комфортність сну, тобто зберігають природне й ненапружене положення тіла людини, а також необхідний мікроклімат як у підковдровому просторі, так і в області голови та шиї. Це пояснюється вибагливістю сучасних споживачів і підвищенням вимог, які висуваються на досить конкурентному ринку постільних виробів.

Постановка проблеми. Якість та безпечність подушок для сну вченими практично не вивчалися. Особливо важливо досліджувати питання безпечності та якості як сировини, так і готового виробу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Приділяється значна увага якості та безпечності постільної білизни, тканин для її виготовлення, використання екологічного текстилю у виробках для дітей, зокрема, подушок.

Виділення не досліджених частин загальної проблеми. Дослідження якості та безпечності подушок для сну з текстильними та пір'яно-пуховими наповнювачами мають фрагментарний характер та практично не вивчені.

Постановка завдання. Провести оцінювання якості та безпечності матеріалів наповнювачів та чохла подушок для сну українського виробника.

Виклад основного матеріалу. З'ясовано, які нормативні документи визначають якість та безпечність подушок для сну з текстильними і пір'яно-пуховими наповнювачами. За допомогою стандартних та оригінальних методик досліджено якість та безпечність подушок для сну та їхніх наповнювачів і чохла.

Висновки відповідно до статті. За органолептичними та фізико-хімічними показниками всі досліджувані зразки подушок із пір'яно-пуховими та текстильними наповнювачами відповідали вимогам нормативної документації. Результати державної санітарно-епідеміологічної експертизи досліджуваних подушок підтвердили їх відповідність вимогам діючого санітарного законодавства та можливість використання в заявленій сфері. Показано, що обробка наповнювачів подушок біоцидними препаратами дозволяє вважати їх грибостійкими до музейних штамів грибів. Рекомендовано на маркуванні наносити інформацію щодо біоцидної обробки.

Запропоновано нову назву різних видів запахів, які є типовими для подушок.

Ключові слова: подушки; якість; безпечність; чохол; наповнювач.

Табл.: 2. Рис.: 1. Бібл.: 28.

Актуальність теми дослідження. Постільні вироби з об'ємними наповнювачами, зокрема, ковдри, подушки, матраци та на матрацники, відповідають за комфортний відпочинок і сон людини, таким чином безпосередньо впливаючи на її самопочуття. Серед цих виробів під час сну необхідну зручність в області голови та шиї, а також природне і ненапружене положення тіла людини, близьке до природного, забезпечують саме подушки. З появою нових технологій та розвитком виробництва виробів домашнього текстилю на сьогодні на перший план виступають проблеми якості подушок для сну. Це пояснюється вибагливістю сучасних споживачів і підвищенням вимог, які висуваються на досить конкурентному ринку постільних виробів.

Постановка проблеми. Широке різноманіття подушок для сну цієї асортиментної групи вимагає глибокого знання їхніх характеристик, адже подушка безпосередньо контактує з тілом людини. Оскільки одним із напрямів надання нових властивостей текстильним виробам є обробка їх біоцидними препаратами, особливої важливості набувають дослідження безпечності та якості як сировини, так і готового виробу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Учені приділяють значну увагу якості та безпечності постільної білизни [1; 2], або тканин для її виготовлення [3–5]. При цьому окремі вчені займаються питаннями використання екологічного текстилю у виробках для дітей, зокрема, подушок [6], безпечності наповнювачів для них [7] або ж порівняльного аналізу подушок для сну українських виробників [8], інші, зокрема іноземні науковці, переймаються дизайном подушок [9], проблемами розробки та порівняльної оцінки нових форм подушок [10], вивчають вплив подушок на біль у шиї, головний біль і сон [11]. Питання оцінки біостійкості текстильних матеріалів, зокрема наповнювачів для постільних виробів, висвітлено в [12].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Водночас дослідження якості та безпечності подушок для сну з текстильними та пір'яно-пуховими наповнювачами мають фрагментарний характер та практично не вивчені.

Постановка завдання (мета статті). Основна мета цього дослідження – провести оцінювання якості та безпечності матеріалів чохла та наповнювачів подушок для сну українського виробника ТОВ «Герд Біллербек ГмбХ» (м. Київ, Україна) та визначити їх відповідність вимогам чинних нормативних документів.

Об'єктом роботи є подушки для сну з різними наповнювачами, зокрема з пір'яно-пуховими (зразки 1; 2), синтетичними (зразки 3; 4) та наповнювачами із синтетичного волокна, що оброблене біоцидним препаратом «Бактрим» (зразок 5). Оброблення проводилося поверхневим методом (методом розпилювання). На нову продукцію розроблені технічні умови та отримано висновок санітарно-епідеміологічної експертизи.

ТОВ «Герд Біллербек ГмбХ» відома в багатьох європейських країнах компанія, яка випускає достатньо широкий асортимент постільної продукції з різними об'ємними наповнювачами, у тому числі подушки пір'яно-пухові, з пухом водоплавної птиці, бавовняним, евкالیптовим та бамбуковим волокнами, а також із силіконізованими синтетичними волокнами.

Експериментальні дослідження проведені в лабораторії аналітичних досліджень та випробувань продукції науково-технічного центру підтвердження відповідності, стандартизації та випробувань продукції легкої промисловості та засобів індивідуального захисту ДП «Укрметргестандарт» (м. Київ) та лабораторії виробничого підприємства ТОВ «Герд Біллербек ГмбХ». Біостійкість наповнювачів для подушок проводилися в Центральній науково-дослідній лабораторії та лабораторії промислової токсикології Львівського національного медичного університету імені Данила Галицького.

В Інституті хімії поверхні ім. О. О. Чуйка НАН України проведено дослідження структури і поверхневих змін синтетичного волокна, використовуючи скануючий електронний мікроскоп (СЕМ) MIRA3 LMU, Teskan з роздільною здатністю ± 1 нм, де попередньо на зразки нанесено шар золота.

Виклад основного матеріалу. Треба зазначити, що існує проблема в термінології щодо визначення терміна «подушка» [13]. Є відмінні трактування цього поняття в різних літературних джерелах. Наприклад, «подушка – це набитий пухом, пір'ям, сіном чи іншим начинням мішок, що використовується як м'яка підстилка під голову, для сидіння та інших цілей» [14], або – «постільна білизна, на яку кладуть голову під час відпочинку, що складається з обшивки та наповнювача» [15].

Державним стандартом, який встановлює вимоги щодо якості подушок з пір'яно-пуховим наповнювачем, є ДСТУ EN 13186:2010 «Білизна постільна, наповнена пером і пухом». Даний документ ідентичний європейському EN 13186 Feather and down – Specification for feather and down filled bedding articles (Перо і пух. Технічні вимоги до постільної білизни, наповненої пером та пухом) [15]. Стандарт поширюється на постільну білизну, наприклад, стьобані ковдри, подушки всіх видів та розмірів, наповнені винятково новим пухом і (або) пір'ям.

Цей нормативний документ встановлює такі технічні вимоги до пір'яно-пухових виробів:

- *гігієна та вимоги чистоти.* Усі наповнювачі мають відповідати вимогам ДСТУ EN 12935:2008 (Пір'я й пух. Гігієна та вимоги чистоти) [16]:

- ✓ індекс кисню – менше ніж 20;
- ✓ мікробіологічні показники:
 - кількість мезофільних аеробних бактерій – менше ніж 10^6 КУО/г;
 - кількість осаду стрептококу – менше ніж 10^2 КУО/г;
 - кількість клостридій, зменшених сульфітом – менше ніж 10^2 КУО/г;
 - наявність сальмонели – немає у 20 г;

- ✓ додаткові показники нечистоти:
 - вміст масла і жиру – від 0,5 до 2,0 %;
 - густина – щонайменше 300 мм;
 - рН – від 6,6 до 8,0.
 - *склад наповнювача*;
 - *міцність наповнювача* (висота об'єму, який займає матеріал наповнення, що перебуває під впливом певного тиску, у міліметрах (ДСТУ EN 12130:2010 [17]));
 - *вимірювання* (фактичні значення показників зміни лінійних розмірів виробу за шириною і довжиною не повинні відрізнятись більше ніж на 5 % від розмірів, зазначених на ярлику);
 - *тривкість фарбування та стабільність розмірів* (мінімальні значення тривкості фарбування до дії води, тертя, прання, хімічного чищення, потовиділення, світлотривкість та плям від води мають бути не нижче 4 балів);
 - *пухонепроникна властивість* (здатність обшивки достатньою мірою утримувати наповнювач);
 - *маса наповнювача*;
 - *маркування* (кожен готовий виріб має містити ярлик принаймні з такою інформацією: посилання ДСТУ EN 13186:2010, склад наповнювача, склад сировини волокон обшивки, номінальний розмір, номінальну масу наповнювача, ідентифікацію, зміну лінійних розмірів виробу, якщо вона має місце).

Сировина, отримана на птахівницьких підприємствах, має відповідати вимогам ДСТУ 4609:2006 і бути вироблена під державним ветеринарно-санітарним контролем та наглядом [18]. Сировину потрібно заготовляти в господарствах, благополучних щодо захворювань птиці. У разі неблагополуччя господарства щодо інфекційних захворювань обов'язково проводять знешкоджування сировини згідно з чинними нормативно-правовими актами.

За органолептичними та фізико-хімічними показниками розсортована свіжа сировина повинна відповідати вимогам, наведеним у табл. 1 [18].

Таблиця 1

Вимоги до якості пір'яно-перової сировини

Показники	Характеристика та норми					
	пух		пір'я покривне			
	гусячий	качиний	гусяче	качине	куряче, цесарине	курчат
Зовнішній вигляд	чистий, без пожовтіння		ціле, чисте, пружне			
Запах	природний, без гнилісного, пліснявого та інших сторонніх запахів					
Масова частка вологи, %, не більше ніж	12					
Масова частка компонентів, %, не більше ніж						
підкрилка	не дозволено		3,0	3,0	5,0	16,0
пір'я дрібного	15,0	15,0	не регламентовано			
Масова частка відходів, %, не більше ніж:						
пір'я поламаного	не дозволено		1,0	1,5	2,0	2,0
пір'я недозрілого	не дозволено		1,5	2,0	2,0	30
засміченості	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5

Наявність патогенної та умовно-патогенної мікрофлори в сировині не дозволена.

На сьогодні державного стандарту, який би встановлював вимоги до якості подушок із наповнювачами, відмінними від пуху та пір'я, в Україні немає, тому виробники цієї продукції розробляють Технічні умови (далі – ТУ) – нормативні документи, що встановлюють внутрішні технічні вимоги, яким повинна відповідати продукція, процес або

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

послуга, та визначають процедури, за допомогою яких може бути встановлено, чи дотримані такі вимоги.

Виробничим підприємством ТОВ «Герд Біллербек ГмбХ» розроблено та впроваджені у виробництво відповідні технічні умови на подушки, зокрема ТУ У 23157247.001-1999 «Вироби стьобані» (зі змінами 2015 р.), ТУ У 23157247.002-2001 (зі змінами 2015 р.), ТУ У 17.4-14338122-003:2006 «Вироби перо-пухові спальні. Ковдри та подушки. Технічні умови» (зі змінами 2012 р.), ТУ У 17.4-14338122-004:2006 «Вироби спальні стьобані. Технічні умови», ТУ У 13,9-200112815-005:2018 «Вироби постільні з біоцидною обробкою. Технічні умови».

Зазначені технічні умови поширюються на подушки та інші вироби подібного призначення з різними наповнювачами та регламентують розміри, масу і склад наповнювача, хоча і зауважують, що за погодженням зі споживачем допускається виготовлення виробів інших розмірів та зміна маси наповнювача. Тканини і матеріали виготовлення виробів повинні відповідати нормативній документації, яка чітко визначена в ТУ. А кожен елемент виробу, країна-виробник, вид тканини, призначення мають бути прописані. Імпортовані матеріали повинні мати гігієнічні висновки Міністерства охорони здоров'я (МОЗ) України та сертифікати відповідності, а овеча вовна повинна мати довідку ветеринарної служби безпеки та погодження з МОЗ України.

У наведених технічних умовах детально прописуються вимоги до розкрою, пошиття, наповнення подушок, маркування, пакування виробів. Описуються і вимоги безпеки та охорони навколишнього середовища, правила приймання продукції та методи контролю якості товару, транспортування та зберігання, вказівки щодо експлуатації. І останнім пунктом є гарантії виробника, де тлумачиться, що виробник гарантує відповідність якості виробів при дотриманні споживачем умов експлуатації 1 рік.

Дослідження якості подушок, зокрема наповнювача та чохла проводилися нами за стандартними та оригінальними методиками.

Найменування та цільове призначення виробу визначалося органолептичним методом, шляхом порівняння зовнішнього вигляду товару з інформацією, вказаною на його маркуванні та у товаросупровідних документах.

Лінійні вимірювання проводилися за допомогою лінійки.

Визначення рівномірності розподілу наповнювача здійснювалося органолептичним методом на дотик.

Якість строчки та швів оцінювалася органолептичним методом, уважно оглядаючи виріб.

Склад наповнювача встановлювався таким чином: з кожного виробу вибірки відбирали точкові проби наповнювача, маса об'єднаної проби не менше 200 г для пір'яних і 50 г для пухових і напівпухових наповнювачів; об'єднану пробу перемішували на чистій гладкій поверхні і відбирали наважку не менше 5 г; наважку переносили на лист глянцевого паперу і відбирали напівфабрикати, зважуючи з точністю до 10 мг [19].

Міцність наповнювача підготовленого для випробування, певної маси визначали шляхом його розміщення в циліндрі та наповнення повітрям продуванням протягом установленого часу. За допомогою поршня стискали зразок матеріалу наповнювача зі сталою швидкістю, а після визначеного часу записували рівень висоти поршня. Об'єм маси обчислювали з огляду на висоту і відомий діаметр проградуйованого циліндра [17].

Масу наповнювача дізнавалися зважуванням готових для наповнення наволочок на дозуючих установках; наволочку наповнювали заданим складом та знову зважували. Вимірювана маса наповнювача не повинна відрізнятися на 5 % від установленої маси [20].

Масова частка вологи вимірювалася згідно з ДСТУ ГОСТ 30332-95 [20].

Вимірювання *висоти подушки без навантаження та під час навантаження* проводилися згідно з Технічним описом для подушок Збройних сил України [21]. Виріб мак-

симально рівно розміщувався на твердій рівній горизонтальній поверхні. Наповнювач максимально рівно розподілений по всій площині виробу, що відповідає нормальному стану і положенню виробу перед сном. Використовувався вантаж вагою 4,75 кг, який відповідає розрахунковому значенню ваги голови середньостатистичної людини. Вантаж у своїй нижній частині, яка при тестуванні контактує з поверхнею готового виробу, повинен максимально повторювати розміри та форму голови людини, що максимально наближено відтворює тиск голови на готовий виріб під час сну. Основа вантажу має бути така, щоб поверхня готового виробу не приклеювалась/не скріплювалась із вантажем унаслідок тривалого контакту.

Далі вимірювали висоту готового виробу у вільному стані (відстань від верхньої поверхні виробу в центральній точці горизонтальної поверхні до центральної точки на нижній горизонтальній поверхні виробу). Вантаж встановлювався згори на горизонтальну поверхню готового виробу таким чином, щоб центр навантаження припадав посередині горизонтальної поверхні. Вантаж утримували до моменту контакту з поверхнею виробу.

Вимірювали висоту виробу під навантаженням (у центральній точці та по обидва боки від місця розміщення вантажу). Виріб перебував під тиском 8 год, що відповідає нормальному часу сну людини. По завершенню 8 год вимірювали висоту виробу, який ще знаходився під навантаженням.

По завершенню 8 год. знімали вантаж із виробу і залишали на 16 год, що відповідає часу, який минає до початку наступного сну людини. Через 16 год вимірювали висоту подушки в центральній точці.

Пухонепроникність чохла проводилася за методикою згідно з ДСТУ EN 13186:2010 [15]. Цей стандарт описує метод визначення пір'я і пухонепроникної властивості тканинної оболонки, наповненої пір'ям і/або пухом, за допомогою приладу, що імітує процес експлуатації виробу. З тканини, призначеної для випробувань, виготовляли подушку певних розмірів, яку наповнювали встановленою кількістю пера і/або пуху. Перед випробуванням подушку поміщали в поліетиленовий мішок. Це забезпечило збір усіх частинок наповнювача, які повністю пройшли через тканину подушки.

Мішок разом із подушкою складали навпіл уздовж короткої сторони і поміщали між затискачами приладу. Краї подушки закріплювали в затискачах. На лічильнику числа обертів диска встановлювали значення 2700. Прилад включали, і після скоєння диском 2700 обертів (приблизно через 20 хв) він автоматично вимикався.

Подушку витягували з поліетиленового мішка та перераховували всі частинки наповнювача, що знаходився в мішку. Подушку розглядали при достатньому освітленні й підраховували кількість частинок наповнювача, які виступали з тканини подушки більше ніж на 2 мм. Якщо сумарна чисельність частинок наповнювача, що були в поліетиленовому мішку і які виступали з тканини подушки, перевищувало 50, то їх підрахунок припиняли.

Повітропроникність чохла (здатність тканин пропускати повітря) оцінювалася за стандартною методикою згідно ГОСТ 12088-77 [22].

Гігроскопічність чохла (здатність матеріалу поглинати водяні пари з повітря в результаті абсорбції) визначалася відповідно до ДСТУ ГОСТ 3816:2009 [23].

Поверхнева густина чохла (маса одиниці площі тканини (1 м^2) встановлювалася зважуванням шматків тканини на вагах та обчисленням ваги 1 м^2 (ГОСТ 3811-72) [24].

Проаналізовані нами органолептичні та фізичні показники якості подушок ТОВ «Герд Біллербек ГмбХ» із різним складом наповнювачів. Результати дослідження наведені в табл. 2.

Оцінка якості подушок ТОВ «Герд Біллербек ГмбХ»

Показник	Зразок № 1: «Венеція»	Зразок № 2: «Іріс»	Зразок № 3: «Бетгі»	Зразок № 4: «Лілія»	Зразок № 5
подушка					
Довжина по боковим сторонам, $(70,0 \pm 3,5)$ см	70,1	70,0	68,0	70,5	70,5
Довжина по середині виробу, $(70,0 \pm 3,5)$ см	70,0	69,9	68,0	70,5	70,5
Ширина виробу по краям, $(50,0 \pm 2,5)$ см	49,8	50,0	49,0	51	51
Ширина виробу по середині, $(50,0 \pm 2,5)$ см	49	50,0	49,0	51	51
наповнювач					
Склад наповнювача, %	92 – пух, 8 – пір'я	6 – пух, 94 – пір'я	поліефірне волокно	поліефірне волокно	поліефірне волокно
Міцність наповнювача, $\text{см}^3/\text{г}$	0,3	0,1	0,27	0,24	0,24
Маса наповнювача, г, ± 5 %	691	1103	649	605	650
Масова частка вологи, %	10	11	-	-	-
Висота виробу без навантаження, см	19	18	18	17	18
Висота виробу під час навантаження, см	10	11	9	8	9
чохол					
Пухонепроникність, %	22	25	-	-	-
Повітропроникність, $\text{дм}^3/\text{м}^2\text{с} \geq 20$	78	80	85	87	80
Гігроскопічність, $\% \geq 6,0$	10,8	9,7	7,3	8,9	9,0
Поверхнева густина, $\text{г}/\text{м}^2$	146	144	136	124	143

За органолептичними показниками всі зразки відповідали вимогам нормативної документації. Наповнювач був рівномірно розподілений у чохлах, шви рівні, без надставок. Довжина, ширина готового виробу, маса наповнювача, склад наповнювача збігалася з інформацією, зазначеною на маркуванні.

Підсумовуючи зазначимо, що переважна більшість фізичних показників досліджуваних зразків подушок ТОВ «Герд Біллербек ГмбХ» із різним складом наповнювачів відповідала вимогам стандарту. На нашу думку, в інформацію на маркуванні подушок доцільно ввести такі показники, як *висота виробу без навантаження* та *висота виробу під час навантаження*, оскільки часто певний дискомфорт під час сну спричинює те, що подушка має значну усадку під час сну, або навпаки є занадто високою.

Як видно з даних табл. 2, нами було розраховано міцність наповнювача (показник, що показує, який об'єм займає задана маса матеріалу наповнення, коли перебуває під впливом тиску) для кожного зразка. Зазначимо, що у випадку із подушками цей показник є інформативним і на нього не має чітких нормативів.

Оцінюючи якість подушок ми перевіряли якість чохла, бо яким б якісним не були пух чи пір'я, чохол повинен утримувати їх усередині виробу та не пропускати назовні, а також бути гігроскопічним та добре пропускати повітря для уникнення скупчення вологи всередині виробу, оскільки тіло людини під час сну виділяє значну частку вологи. Як показали наші дослідження, пухонепроникність, поверхнева густина, повітропроникність, гігроскопічність чохла всіх зразків подушок відповідали вимогам нормативних документів.

Дослідження масової частки вологи проводилося нами лише для подушок із пір'яно-перовим наповнювачами, оскільки синтетичні наповнювачі не витримують високих температур, це і робить неможливим визначення масової частки вологи в інших

зразках. Значення масової частки вологи в подушках «Венеція», «Іріс» відповідає вимогам стандарту. Вимірювання пухонепроникності чохла є доцільними тільки для подушок із пір'яно-пуховим наповненням.

Загалом усі досліджувані зразки подушок за сукупністю органолептичних та фізичних показників цілком задовольняли вимогам і характеризувалися високими споживними властивостями.

Результати державної санітарно-епідеміологічної експертизи досліджуваних подушок підтвердили їх відповідність вимогам чинного санітарного законодавства України та можливість використання в заявленій сфері. Зразки подушок з пір'яно-пуховим наповнювачем відповідали встановленими медичним критеріями безпеки. *Допустимі рівні міграції токсичних компонентів* не перевищували в повітряне середовище ($\text{мг}/\text{м}^3$): формальдегід – 0,003, аміак – 0,04, метиловий спирт – 0,5, ксилол – 0,2, толуол – 0,6, ацетон – 0,35, фенол 0,003, ізопропиловий спирт – 0,6, бутиловий спирт – 0,1, бензол – 0,1 згідно з Державними санітарними нормами та правилами «Матеріали та вироби текстильні, шкіряні та хутрові. Основні гігієнічні вимоги» № 1138 [26]; в рідке середовище ($\text{мг}/\text{м}^3$): формальдегід – 75, свинець – 1,0, кадмій – 0,1, кобальт – 4,0, мідь – 50 відповідно до ДСТУ 4239:2003 «Матеріали та вироби текстильні і шкіряні побутового призначення. Основні гігієнічні вимоги» [27].

Зразки подушок з синтетичним наповнювачем також відповідали встановленим медичним критеріями безпеки. *Гранично допустимі критерії хімічних речовин в атмосферному повітрі* ($\text{мг}/\text{м}^3$) становили не більше: формальдегіду – 0,003, фенолу 0,003, бензолу – 0,1, толуолу – 0,6, ксилолу – 0,2; інтенсивність запаху не більше ніж 2 бали (у виробках для дітей – не більше за 1 бал); напруженість електростатичного поля була не більше за 15,0 кВ/м згідно з Державними санітарними нормами та правилами «Матеріали та вироби текстильні, шкіряні та хутрові. Основні гігієнічні вимоги» [26].

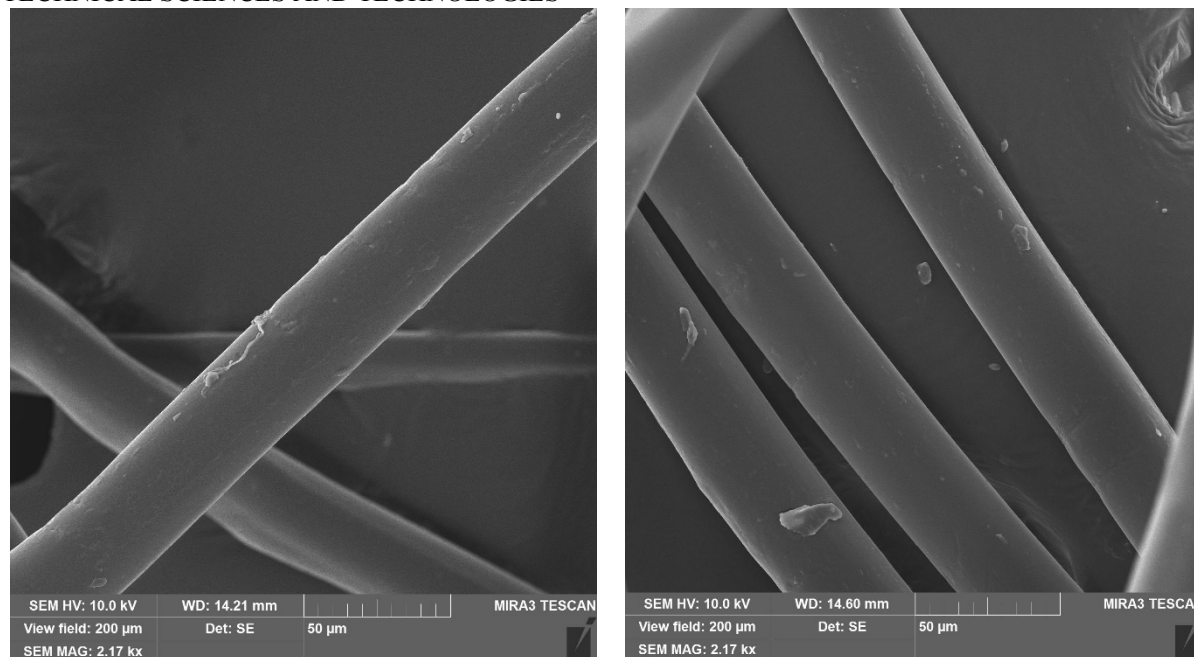
Подушка із синтетичним наповнювачем, що оброблена біоцидним препаратом «Бактрим», відповідала медичним критеріями безпеки. *Гранично допустимі критерії хімічних речовин в атмосферному повітрі* ($\text{мг}/\text{м}^3$) становили не більше: формальдегіду – 0,003, фенолу – 0,003, бензолу – 0,1, толуолу – 0,6, ксилолу – 0,2; інтенсивність запаху не більше ніж 1 бал [26]. Виявлено антимікозний захист препарату «Бактрим» щодо грибової корозії постільних виробів із різним типом наповнювача та фунгіцидна дія цього препарату щодо досліджуваних тестових штамів грибів.

Оскільки синтетичні волокна за структурою принципово відрізняються від натуральних та штучних, вони пошкоджуються мікроорганізмами значно складніше. Серед мікроорганізмів, які руйнують синтетичні волокна, ідентифіковані гриби роду *Trichoderma*, які з часом розрихлюють волокна [28].

На рис. 1 зображено фото зразків синтетичних наповнювачів для подушок, що інокульовані спорами грибів *Trichoderma* на 28 день тестування оброблені препаратом «Бактрим» (рис. 1, а) та не оброблені даним біоцидним препаратом (рис. 1, б).

Отже, текстильні наповнювачі з синтетичних волокон, попередньо оброблених біоцидним препаратом «Бактрим», можна вважати грибостійкими до музейних штамів грибів.

Визначення характеру та інтенсивності запаху подушок проводилися нами шляхом залучення експертів, які не мали змін органів нюху і порожнини носа, у добре освітленому та провітрюваному приміщенні. Варто зазначити, що визначення рівня запаху є одним із критеріїв оцінки якості подушок. Встановлення характеру й оцінки інтенсивності запаху є одориметричними дослідженнями (дослідження нюхового аналізатора шляхом визначення мінімальної концентрації пахучої речовини, що здатна спричинити нюхове відчуття).



а

б

*Рис. 1. СЕМ-зображення синтетичних наповнювачів для подушок, що інюльовані спорами грибів *Trichoderma* на 28 день тестування:*

а – наповнювач оброблений препаратом «Бактрим»;

б – наповнювач не оброблений препаратом «Бактрим»

При встановленні характеру запаху зверталася увага на наявність чи відсутність стороннього неприємного і непритаманного для цього виробу запаху тощо.

Відповідно до [26] інтенсивність запаху визначалася за п'ятибальною шкалою (Райт Р. Х., 1966 р.):

0 – відсутній, не виявляється жодним з експертів;

1 – ледве помітний, виявляється найбільш чутливими особами;

2 – слабкий, привертає увагу, але визначається, якщо експерти націлені на його визначення;

3 – виразний, легко відчутний, якщо навіть увагу експерти не звертають на нього;

4 – сильний, звертає на себе увагу;

5 – нестерпний, виключає можливість тривалий час перебувати в приміщенні.

Нами запропоновано такі види запахів, які є типовими для подушок:

- затхлий;
- бактеріальний, грибковий;
- немитого текстильного волокна;
- пір'я та пуху.
- пластичних мас;
- пильний;

Дослідження проводили не менше трьох разів кожним експертом в різні дні. Цифрові дані та характер запаху вносилися до робочої таблиці. Зауважимо, що інтенсивність запаху подушок для дітей не повинна перевищувати 1 бал, а для дорослих – 2 бали.

При оцінці якості подушок за критерієм «рівень запаху» було виявлено, що в зразку № 1 «Венеція» та № 2 «Іріс» дещо проявлявся слабкий запах пуху, який привертав увагу, однак цей показник був у допустимих межах. Це є абсолютно нормальним явищем, оскільки досліджувані подушки були всі нові й після виробництва був наявний залиш-

ковий запах сировини, який швидко вивітрювався. Зразки № 3, 4 та 5 мали ледве помітний запах пластичних мас, який не створював дискомфорту при експлуатації подушок.

Загалом за результатами експертного дослідження запаху зразків подушок встановлено, що всі подушки відповідали вимогам нормативної документації.

Висновки відповідно до статті. Таким чином, проведені дослідження подушок із різним складом наповнювачів виробництва ТОВ «Герд Біллербек ГмбХ» (як готових виробів, так і окремо наповнювачів та чохлав подушок) дозволили встановити наступне.

За органолептичними та фізико-хімічними показниками всі дослідні зразки відповідали вимогам нормативної документації. Наповнювачі були рівномірно розподілені в чохлах, шви рівні, без надставок, довжина і ширина готового виробу, маса наповнювача, склад наповнювача збігалися з інформацією, зазначеною на маркуванні. Вважаємо за доцільно ввести інформацію про висоту виробу без навантаження та висоту виробу під час навантаження. Запропоновано нові назви різних запахів, які є типовими для подушок.

Текстильні наповнювачі із синтетичних волокон, попередньо оброблених біоцидним препаратом «Бактрим», можна вважати грибостійкими до музейних штамів грибів. Рекомендується на маркуванні наносити інформацію щодо біоцидної обробки.

Пухонепроникність, поверхнева густина, повітропроникність, гігроскопічність чохлав усіх зразків подушок, а також значення масової частки вологи в подушках «Венеція» та «Іріс» (для подушок із синтетичним наповнювачем цей показник не вимірювався) відповідали вимогам нормативних документів.

Результати державної санітарно-епідеміологічної експертизи досліджуваних подушок підтвердили їх відповідність вимогам чинного санітарного законодавства України та можливість використання в заявленій сфері.

Список використаних джерел

1. Пушкар Г. О., Семак Б. Д. Товарознавчі аспекти формування сучасного асортименту елітної білизни. *Вісник ХНТУ*. 2015. № 2 (25). С. 75–80.
2. Михайлова Г. М., Осовіцька В. С. Зносостійкість постільної білизни. *Підприємництво, торгівля, маркетинг: стратегії, технології та інновації*: Міжнародна науково-практична Інтернет-конференція (Київ, 23 травня 2018). Київ, 2018. С. 112–114.
3. Супрун Н. П., Мархай М. А., Поліщук Л. В., Озимок Г. В. Екологічні тканини для постільної білизни. *Науковий вісник Полтавського університету економіки і торгівлі*. 2010. № 1 (46). С. 37–39.
4. Озимок Г. В. Тканини для постільної білизни. *Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України*. 2013. Вип. 23.8. С. 166–171.
5. Пушкар Г. О., Семак Б. Д. Шляхи оптимізації асортименту та підвищення екологічної безпеки інтер'єрних тканин для постільної та столової білизни. *Вісник КНУТД*. 2010. № 1. С. 140–146.
6. Супрун Н. П., Горбачова Л. М., Безрукава М. М. Використання екологічного текстилю у виробках для дітей. *Вісник ХНТУ*. 2011. № 3. С. 77–80.
7. Михайлова Г. М., Гілевич Ю. В. Електрична безпека постільних виробів з об'ємними наповнювачами. *Технічні науки та технології: науковий журнал*. 2015. № 2. С. 227–231.
8. Михайлова Г. М., Комашевська О. Порівняльний аналіз якості подушок для сну різних виробників. *I Міжнародна науково-практична Інтернет-конференція (27 листопада 2018 р.)*. Старобільськ, 2018. С. 145–149.
9. Li, Tsung-yao & Wu, Fong-gong (2018). Pillow Design and Evaluation of Shoulder and Neck Surface Pressure to Sleep Quality. Chapter from book '*Advances in Ergonomics in Design*' (pp. 786–795).
10. Jin-Gang Her, Do-Heung Ko, Ji-Hae Woo, Young-Eun Choi. Development and Comparative Evaluation of New Shapes of Pillows. *Journal of Physical Therapy Science*. 2014 Mar., № 26 (3). P. 377–380.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

11. Persson Liselott. Neck pain and pillows – A blinded study of the effect of pillows on non-specific neck pain, headache and sleep. *Advances in Physiotherapy*. 2009 July. № 8 (3). P. 122–127.
12. Михайлова Г., Платонова І., Бричка С. Біостійкість текстильних наповнювачів для постільних виробів. *Товари і ринки*. 2018. № 3. С. 37–49.
13. Слізков А. М., Михайлова Г. М. Постільні вироби: проблеми термінології. *Підприємство, торгівля, маркетинг: стратегії, технології та інновації*: Міжнародна науково-практична Інтернет-конференція. Київ, 2018. С. 107–112.
14. Великий тлумачний словник сучасної української мови / уклад. і голов. ред. В. Т. Бусел. Київ; Ірпінь. ВТФ «Перун», 2004. 1440 с.
15. ДСТУ EN 13186:2010. Білизна постільна, наповнена пером і пухом. Технічні умови. [Чинний від 2012-07-01]. Київ: Держспоживстандарт України, 2014. 10 с.
16. ДСТУ EN 12935:2008. Пір'я й пух. Гігієна та вимоги чистоти. [Чинний від 2010-01-01]. Київ: Держспоживстандарт України, 2014. 3 с.
17. ДСТУ EN 12130:2010. Перо та пух. Метод визначення об'єму наповнення. [Чинний від 2012-07-01]. Київ: Держспоживстандарт України, 2014. 7 с.
18. ДСТУ 4609:2006. Сировина пір'яно-пухова. Технічні умови. [Чинний від 2007-07-01]. Київ: Держспоживстандарт України, 2017. 11 с.
19. EN 12131:2018 Feather and down – Test methods – Determination of the quantitative composition of feather and down (manual method). 14 p.
20. ДСТУ ГОСТ 30332:2007. Вироби пір'яно-пухові. Загальні технічні умови. [Чинний від 2007-01-01]. Київ: Держспоживстандарт України, 2008. 17 с.
21. Технічний опис. Подушка для військовослужбовців Збройних Сил України. Київ, 2017. 13 с.
22. ГОСТ 12088-77. Материалы текстильные и изделия из них. Метод определения воздухопроницаемости. [Введен 01-01-1979]. Москва: ИПК Издательство стандартов, 1979. 10 с.
23. ДСТУ ГОСТ 3816:2006. Полотна текстильные. Методы определения гигроскопических и волоотталкивающих свойств. [Чинний від 01-12-2009]. Київ: Держспоживстандарт України, 2006. 15 с.
24. ГОСТ 3811-72. Материалы текстильные. Ткани, нетканые полотна и штучные изделия. Методы определения линейных размеров, линейной и поверхностной плотностей. [Введен 1973-01-01]. Москва: ИПК Издательство стандартов. 1973. 15 с.
25. Юдин Б. В., Разумеев К. Э. Результаты экспериментального исследования одноцикло-вых характеристик компонентов деформации при сжатии массы волокон-наполнителей стеганых одеял и подушек. *Швейная промышленность*. 2009. № 2. С. 38-41.
26. Про затвердження Державних санітарних норм та правил «Матеріали та вироби текстильні, шкіряні і хутрові. Основні гігієнічні вимоги»: Наказ М-ва охорони здоров'я України від 29.12.2012 р. № 1138. URL: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/z0086-13>.
27. ДСТУ 4239:2003. Матеріали та вироби текстильні і шкіряні побутового призначення. Основні гігієнічні вимоги. Київ: Держспоживстандарт, 2004. 17 с.
28. Пехташева Е. Л. Биоповреждения непродовольственных товаров / под ред. проф. А. Н. Неверова. 2-е изд., перер. и доп. Москва: Дашков и К⁰, 2015. 332 с.

References

1. Pushkar, H. O., Semak, B. D. (2015). Tovaroznavchi aspekty formuvannia suchasnoho asortymentu elitnoi bilyzny [Commodity-related aspects of the formation of a modern assortment of elite linen]. *Visnyk KhNTU – Visnyk of Kherson National Technical University*, 2, 75–80 [in Ukrainian].
2. Mihashlova, G. M., Osovicka, V. S. (2018). Znosostiikist postilnoyi bilizni [Wear resistance of bed linen]. *Pidpriyemnictvo, torgivlya, marketing: strategiyi, tehnologiyi ta innovaciyi: Mizhnarodna naukovo-praktichna Internet-konferenciya – Entrepreneurship, Trade, Marketing: Strategies, Technology and Innovation: International Scientific and Practical Internet Conference* (Kyiv, May 23, 2018). Kyiv National University of Trade and Economics [in Ukrainian].
3. Suprun, N. P., Markhai, M. A., Polishuk, L. V., Ozimok, G. V. (2010). Ekologichni tkanini dlya postilnoyi bilizni [Eco-fabrics for bed linen]. *Naukovij visnik Poltavskogo universitetu ekonomiki i torgivli – Scientific Bulletin of Poltava University of Economics and Trade*, 1, 37–39 [in Ukrainian].

4. Ozymok, G. V. (2013). Tkanyny dla postilnoi bilyzny [Fabrics for bed linen]. *Naukovii visnyk Natsionalnoho lisotekhnichnoho universitetu Ukrainy – Scientific Bulletin of UNFU*, 23.8, 166–171 [in Ukrainian].
5. Pushkar, G. O., Semak, B. D. (2010). Shliahy optymizataii asortymentu ta pidvyshennia ekologichnoi bezpechnosti interernykh tkanyn dla postilnoi ta stolovoi bilyzny [Ways of optimization of assortment and increase of ecological safety of interior fabrics for bed and table linen]. *Visnik KNUTD – Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design*, 1, 140–146 [in Ukrainian].
6. Suprun, N. P., Gorbachova, L. M., Bezrukava, M. M. (2011). Vykorystannia ekolohichnogo tekstilyu u virobah dlya ditej [Use of ecological textiles in products for children]. *Visnyk KhNTU – Visnyk of Kherson National Technical University*, 3, 77–80 [in Ukrainian].
7. Mihailova, G. M., Gilevich, Yu. V. (2015). Elektrichna bezpechnist postilnykh vyrobiv z obemnymy napovniuvachamy [Electric safety of bedding products with volumetric fillers]. *Tekhnichni nauky ta tehnolohii – Technical sciences and technologies*, 2, 227–231 [in Ukrainian].
8. Mihailova, G. M., Komashchevska, O. (2018). Porivnyalniy analiz yakosti podushok dlya snu riznih virobnykiv [Comparative analysis of the quality of pillows for sleeping of different manufacturers]. *I Mizhnarodna naukovo-praktichna Internet-konferenciya – I International Scientific and Practical Internet Conference*. (Starobilsk, November 27, 2018). Starobilsk [in Ukrainian].
9. Li, Tsung-yao & Wu, Fong-gong. (2018). Pillow Design and Evaluation of Shoulder and Neck Surface Pressure to Sleep Quality. Chapter from book ‘*Advances in Ergonomics in Design*’ (pp. 786-795).
10. Jin-Gang Her, Do-Heung Ko, Ji-Hae Woo, Young-Eun Choi. (2014). Development and Comparative Evaluation of New Shapes of Pillows. *Journal of Physical Therapy Science*, 26(3), 377–380.
11. Persson, Liselott (2009). Neck pain and pillows – A blinded study of the effect of pillows on non-specific neck pain, headache and sleep. *Advances in Physiotherapy*, 8(3), 122–127.
12. Mihailova, G., Platonova, I., Brichka, S. (2018). Biostiikist tekstilnykh napovniuvachiv dla postilnykh virobiv [Biostability of textile fillers for bedding products]. *Tovary i rynky – Commodities and Markets*, 3, 37-49 [in Ukrainian].
13. Slizkov, A. M., Mihailova, G. M. (2018). Postilni virobi: problemi terminologiyi [Bedding: Terminology Problems]. *Pidpriyemnictvo, torgivlya, marketing: strategiyi, tehnologiyi ta innovaciyi: Mizhnarodna naukovo-praktichna Internet-konferenciya – Entrepreneurship, Trade, Marketing: Strategies, Technology and Innovation: International Scientific and Practical Internet Conference*] (Kyiv, May 23, 2018). Kyiv: National University of Trade and Economics [in Ukrainian].
14. Busel, V. T. (Ed.) (2004). Velykyi tlumachnyi slovnyk suchasnoi ukrainskoi movy [Great explanatory dictionary of modern Ukrainian language]. Kyiv: Perun [in Ukrainian].
15. Bilizna postilna, napovnena perom i puhom. Tehnichni umovi [Bed linen, filled with feather and down. Technical specifications] (2014). DSTU EN 13186:2010. Kyiv: Derzhspozhivstandart Ukraine [in Ukrainian].
16. Piria i pukh. Hihiena ta vymohy chystoty [Feather and down. Hygiene and cleanliness requirements]. (2014). DSTU EN 12935:2008. Kyiv: Derzhspozhivstandart Ukraine [in Ukrainian].
17. Pero ta pukh. Metod viznachennya ob'yemu napovnennya [Feather and down. Determination of the fill power (massic volume)]. (2014). DSTU EN 12130:2010. Kyiv: Derzhspozhivstandart Ukraine [in Ukrainian].
18. Syrovyna piriano-puhova. Tehnichni umovy [Raw feather and down. Technical specifications] (2017). DSTU 4609:2006. Kyiv: Derzhspozhivstandart Ukraine [in Ukrainian].
19. Feather and down – Test methods – Determination of the quantitative composition of feather and down (manual method) (2018). EN 12131:2018.
20. Vyroby piriano-pukhovi. Zahalni tekhnichni umovy. [Feather and down products. General technical specifications] (2007). DSTU HOST 30332:2007. Kyiv: Derzhspozhivstandart Ukraine [in Ukrainian].
21. Tekhnichniy opys. Podushka dla viiskovosluzhbovtsiv Zbroinykh Syl Ukrainy [Technical description. Pillow for servicemen of the Armed Forces of Ukraine] (2017). Kyiv [in Ukrainian].
22. Materialy tekstilnye i izdeliia iz nikh. Metod opredeleniia vozduhopronitsaemosti [Textile materials and products from them. Method for determining air permeability] (1979). HOST 12088-77. Moscow : IPK Publishing Standards [in Russian].

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

23. Polotna tekstilnyie. Metody opredeleniia gigroskopicheskikh i voloottalkivayuschikh svoistv [Textile cloths. Methods for the determination of hygroscopic and water-repellent properties] (2006). DSTU HOST 3816:2006. Kyiv: Derzhspozhivstandart Ukraine [in Ukrainian].

24. Materialy tekstilnye. Tkani, netkanye polotna i shtuchnye izdeliia. Metody opredeleniia lineinykh razmerov, lineinoi i poverhnostnoi plotnosti [Textile materials. Fabrics, non-woven fabrics and piece goods. Methods for determining of linear dimensions, linear and surface densities] (1973). HOST 3811-72. Moscow: IPK Publishing Standards [in Russian].

25. Iudin, B. V., Razumeev, K. E. (2009). Rezultaty eksperimentalnogo issledovaniia odnotsiklovnykh kharakteristik komponentov deformatsii pri szhatii massy volokon-napolnitelei steganykh odeial i podushek [The results of an experimental study of single-cycle characteristics of deformation components in compression of the mass of filler fillers of quilted blankets and pillows]. *Shveytsariia promyshlennost – Clothing industry*, 2, 38–41 [in Russian].

26. Pro zatverdzhennia Derzhavnykh sanitarnykh norm ta pravyl "Materialy ta vyroby tekstylni, shkiriani i khutrovi. Osnovni hihienichni vymohy" [On Approval of State Sanitary Norms and Rules "Materials and Products of Textile, Leather and Fur. Basic Hygienic Requirements"]. № 1138 (December 29, 2012).

27. Materialy ta vyroby tekstylni i shkiriani pobutovoho pryznachennia. Osnovni hihienichni vymohy [Materials and products of textile and leather for household purposes. Basic hygienic requirements] (2004). DSTU 4239:2003. Kyiv: Derzhstandart Ukraine [in Ukrainian].

28. Pehtasheva, E. L. Biopovrezhdeniia neprodovolstvennykh tovarov [Non-food biodeteriorations] (2015). Moscow: Dashkov i K° [in Russian].

UDC 005.336.3:687.268.1

Galyna Mykhailova, Valentyna Osievska, Svitlana Galko, Galyna Ozymok

QUALITY AND SAFETY RESEARCH OF PILLOWS FILLERS AND COVERS MATERIALS FOR SLEEP

Urgency of the research. Pillows provide the comfort of sleep, that is, they preserve the natural and unstressed positions of the human body, as well as the necessary microclimate both in the space under the blanket and in the head and neck area. This is due to the demands of modern consumers and the increasing demands placed on a fairly competitive market for bed products.

Target setting. The quality and safety of pillows for sleep has almost never been studied by scientists. It is especially important to research the issue of safety and quality of both raw materials and finished products.

Actual scientific researches and issues analysis. Considerable attention is paid to the quality and safety of bed linen, fabrics for its manufacture, and to the usage of ecological textiles in products for children, pillows in particular.

Uninvestigated parts of general matters defining. The research of the quality and safety of pillows for sleep with textile and feather-down fillings has fragmented features and has never practically been conducted.

The research objective. To assess the quality and safety of materials of fillers and covers of pillows for sleep of Ukrainian manufacturer.

The statement of basic materials. It was determined which regulatory documents determine the quality and safety of pillows for sleep with textile and feather-down fillings. The quality and safety of pillows for sleep and their fillers and covers has been checked by using standard and original methods.

Conclusions. All samples of pillows with textile and feather-down fillings met the requirements of regulatory documentation. The results of the state sanitary and epidemiological examination of the pillows confirmed their compliance with the requirements of the current sanitary legislation and the possibility of using them in the declared area.

It is shown that the treatment of pillow fillers with biocidal products makes it possible to consider them resistant to the museum strains of fungi.

It is recommended for markings to put information on biocidal processing.

New names of various types of smells/odors usual for pillows are suggested.

Keywords: pillows; quality; safety; cover; fillers.

Table: 2. Fig.: 1. References: 28.

Михайлова Галина Миколаївна – кандидат технічних наук, доцент, Київський національний торговельно-економічний університет (вул. Кіото, 19, м. Київ, 02156, Україна).

Mykhailova Halyna – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Kyiv National University of Trade and Economics (19 Kyoto Str., 02156 Kyiv, Ukraine).

E-mail: michajlovagalina@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1083-5875>

ResearcherID: N-3285-2016

Осієвська Валентина Валеріївна – кандидат технічних наук, доцент, Київський національний торговельно-економічний університет (вул. Кіото, 19, м. Київ, 02156, Україна).

Osiievska Valentyna – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Kyiv National University of Trade and Economics (19 Kyoto Str., 02156 Kyiv, Ukraine).

E-mail: osiievska@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0077-9734>

ResearcherID: N-3373-2016

Галько Світлана Василівна – кандидат технічних наук, доцент, Київський національний торговельно-економічний університет (вул. Кіото, 19, м. Київ, 02156, Україна).

Galko Svitlana – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Kyiv National University of Trade and Economics (19 Kyoto Str., 02156 Kyiv, Ukraine).

E-mail: svetgal@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2562-8326>

ResearcherID: N-3389-2016

Озимок Галина Володимирівна – кандидат технічних наук, доцент, декан факультету менеджменту, товарознавства та комерційної діяльності, Львівський інститут економіки і туризму, кафедра підприємництва, товарознавства та експертизи товарів (вул. Менцинського, 8, м. Львів, 79007, Україна).

Ozumok Galyna – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Lviv Institute of Economics and Tourism, Dean Faculty of management, commodity and commercial activities, Department of Commodity Research and Commodity Expertise (8 Mentsynskyi Str., 79007 Lviv, Ukraine).

E-mail: ozumok123@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9958-0196>

Віктор Осика, Леонід Коптюх,
Володимир Комаха, Ольга Шульга, Костянтин Мостика

ПАПЕРОТВІРНІ ВЛАСТИВОСТІ ЦЕЛЮЛОЗИ РІЗНИХ ВИДІВ ТА СТУПЕНІВ ПОМЕЛУ

Актуальність теми дослідження. Існує значна кількість схем розмелювання целюлози, що впливає на властивості паперу. У будь-якому випадку характер і ступінь оброблення волокон у процесі розмелювання визначається насамперед їхньою зовнішньою поверхнею, а саме розмірами, морфологічною будовою та структурою волокна, а також його пластичністю та хімічною активністю.

Постановка проблеми. У виробничих умовах основні властивості паперової маси оцінюють з огляду на непрямі визначення її якості, а саме показника ступеня помелу та середньої довжини волокон.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Були розглянуті останні публікації щодо можливості отримання паперу із заданими властивостями шляхом розроблення целюлозних волокон на етапі розмелювання.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Дослідження паперотвірних властивостей целюлозного волокна різного походження в достатньо широкому діапазоні ступеня помелу являє собою актуальний науковий та практичний інтерес для прогнозування властивостей паперу із заданим комплексом споживних властивостей.

Постановка завдання. Мета дослідження полягає у встановленні залежностей між ступенем фібрилювання й укороченням целюлозного волокна та властивостями паперу, отриманого з нього.

Виклад основного матеріалу. Для встановлення залежностей було досліджено різні зразки паперу, що виготовлені із різних видів целюлози хвойної та листяної деревини за різних ступенів помелу.

Висновки відповідно до статті. Результати досліджень дозволяють констатувати, що оптимальний ступінь помелу целюлозних волокон знаходиться в діапазоні 55-65 °ШР. При цьому значну відмінність у показниках механічної міцності та повітропроникності паперу, виготовленого із різних видів целюлози, можна пояснити різною їхньою здатністю до розмелювання, тобто здатністю до укорочення волокна та його фібрилювання.

Ключові слова: властивості паперу; хвойна целюлоза; листяна целюлоза; паперотвірні властивості; ступінь помелу; середня довжина волокон.

Рис.: 5. Бібл.: 15.

Актуальність теми дослідження. Переважна більшість механічних і фізичних властивостей паперу залежить не тільки від хімічного складу, структури і виду волокон целюлози, а й від умов її розмелювання в присутності води [1].

Для деяких видів паперу достатньо отримати в процесі розмелювання незначне укорочення волокон, а при виготовленні паперу з великим вмістом деревної маси він зводиться до рафінування целюлози і до гомогенізації композиції після її змішування з деревною масою [2]. Для виготовлення високоякісного пакувального паперу з необхідним комплексом бар'єрних та захисних властивостей необхідно забезпечити фібрилювання волокна та порівняно незначне його укорочення [3; 4]. При виготовленні вбирного паперу, навпаки, волокна сильно вкорочують без помітного збільшення їхньої активної поверхні [5].

Існує значна кількість схем розмелювання та варіантів поєднання факторів, що впливають на нього, серед яких тривалість процесу, питомий тиск розмелювального гарнітуру на волокна, концентрація і температура волокнистої маси, рН середовища та використання додаткових хімічних речовин [6]. У будь-якому випадку характер і ступінь оброблення волокон у процесі розмелювання визначається насамперед їхньою зовнішньою поверхнею, а саме розмірами, морфологічною будовою та структурою волокна, а також його пластичністю та хімічною активністю.

Постановка проблеми. Вимірювання активності й розмірів зовнішньої поверхні волокна, визначення їх пластичності, внутрішнього фібрилювання та інших найбільш характерних властивостей пов'язані з певними труднощами. Виконання таких вимірювань можливо лише в профільних лабораторіях. У виробничих же умовах основні властивості паперової маси оцінюють зважаючи на непрямі визначення її якості. Здебільшого для виробничих цілей обмежуються визначенням здатності целюлозного волокна вбирати воду та набухати, вимірюючи показник ступеня помелу (°ШР), а також визначенням середньої довжини волокон.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Технологічну сторону впливу різноманітних факторів розмелювання на властивості паперу досліджували багато авторів. Так, у роботах [7-9] показано, що для отримання паперу із заданими механічними властивостями можна регулювати ступінь помелу целюлозного волокна. Високу механічну міцність паперу можна досягнути за більш низького ступеня помелу целюлози, при цьому знижується витрата енергії та поліпшуються умови зневоднення на сітці папероробної машини. Показано, що в однакових умовах сульфатна целюлоза розмелюється швидше, ніж сульфатна з того ж самого виду деревини [10]. При цьому листяна целюлоза з молоді деревини розмелюється швидше, ніж хвойна, однак важче зневоднюється. З практики паперового виробництва відомо, що властивості паперу великою мірою визначаються співвідношенням альфа-целюлози і геміцелюлози, що міститься у волокнистій масі. Вплив геміцелюлоз на властивості паперу висвітлюється в багатьох роботах [11-15], з яких випливає, що присутність геміцелюлоз у складі різних видів волокнистих напівфабрикатів прискорює розмелювання і сприяє підвищенню механічних властивостей паперу.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Паперова маса, залежно від призначення виготовлюваного виду паперу, повинна відповідати певному складу за довжиною волокна та ступенем фібрилювання волокна. Тому дослідження паперотвірних властивостей целюлозного волокна різного походження в достатньо широкому діапазоні ступеня помелу являє собою актуальний науковий та практичний інтерес для прогнозування властивостей паперу із заданим комплексом споживних властивостей.

Постановка завдання (мета статті). Мета дослідження полягає у встановленні залежностей між ступенем фібрилювання й укороченням целюлозного волокна та властивостями паперу, отриманого з нього.

Матеріали та методи. Дослідні зразки паперу виготовляли із сульфатної небіленої (НС-2), сульфатної біленої (Б-І) целюлози хвойних порід деревини (АТ «Балтійська целюлоза», РФ) та сульфатної небіленої (НС-3) листяних порід деревини (АТ «Світлогорський целюлозно-картонний комбінат», Білорусь). Волокнисті напівфабрикати піддавали розпуску та розмелюванню до необхідного ступеня помелу в присутності води в лабораторному ролі VALLEY при швидкості барабана 500 об/хв⁻¹. Ступінь помелу контролювали на приладі Шоппер-Ріглера за стандартною методикою. Дослідні зразки паперу готували за допомогою листовиливного лабораторного приладу із комбінованою сушильною камерою RapidKothern. Дослідження показників якості паперових пакувальних матеріалів здійснювали загальноприйнятими методами: повітропроникність визначали на експрес-приладі ВПТМ.М МТ-160; показники міцності за ДСТУ 2334-94 та ДСТУ ISO 3781:2005.

Виклад основного матеріалу. Властивості паперу значною мірою залежать як від ступеня розмелювання, тобто від більшої або меншої довжини і товщини волокон, так і від характеру розмелювання – механічного рубання целюлозних волокон і їхнього фібрилювання.

Дослідження придатності різних видів целюлози до розмелювання в лабораторних і виробничих умовах дало змогу зробити висновок, що для виготовлення пакувального паперу з однорідною зімкнутою структурою необхідно застосовувати целюлозу зі збереженим високомолекулярним комплексом, тобто високим ступенем полімеризації, а також зниженим вмістом лігніну. Це дає можливість стінкам целюлозних волокон пластифікуватись всмоктаючою водою. Розмелювання такої целюлози до необхідного ступеня помелу відбувається набагато швидше і легше, що можна пояснити підвищеною здатністю її до набухання й фібрилювання завдяки геміцелюлозній складовій. Тому в процесі розмелювання целюлозні волокна стануть більш гнучкими і м'якими.

Зменшення полідисперсності целюлозного волокна, у свою чергу, сприяє значному підвищенню однорідності полотна паперу й забезпечує умови для одержання паперу з рівномірною і зімкнутою структурою.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

На рис. 1 наведені цифрові мікрозображення целюлозного волокна різного ступеня помелу за збільшення у 110 разів.

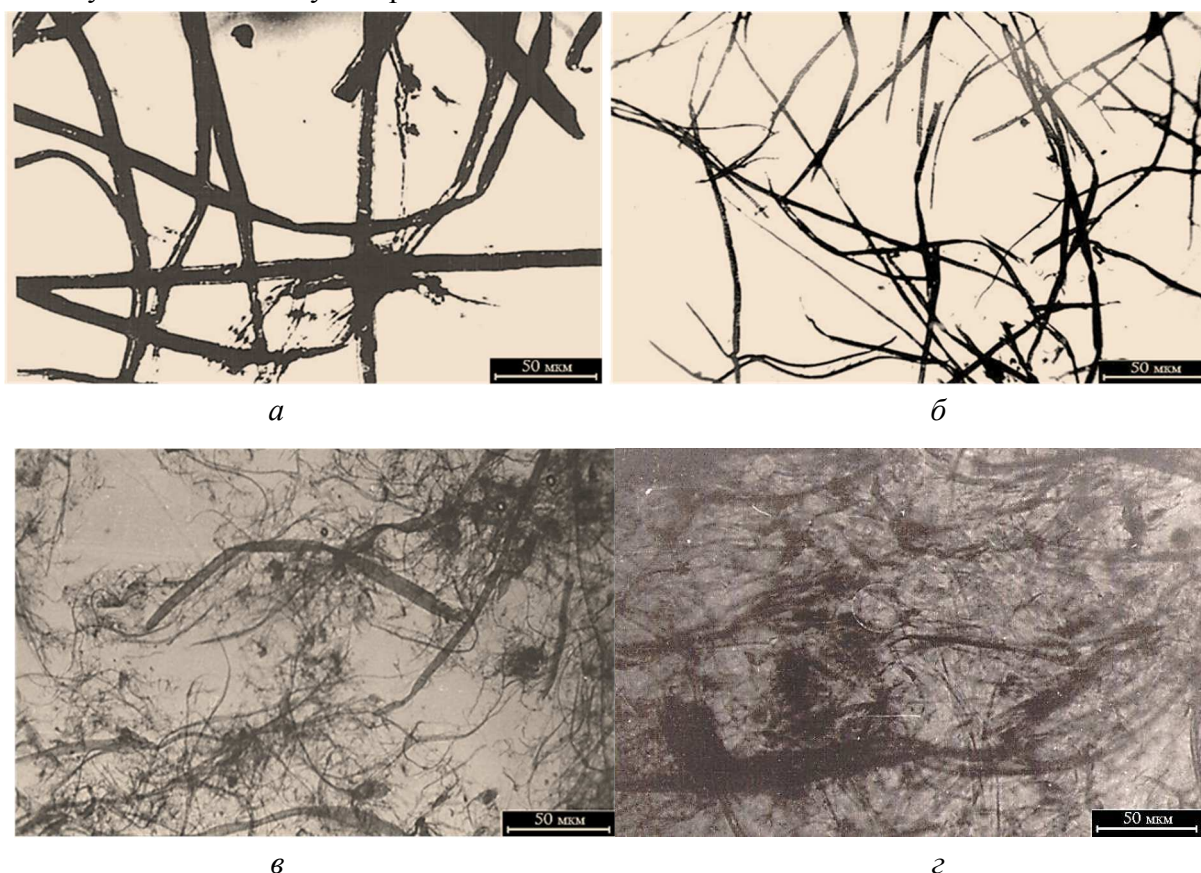


Рис. 1. Цифрові мікрозображення целюлозних волокон різного ступеня помелу:
а – 15 °ШР; б – 35 °ШР; в – 55 °ШР; г – 65 °ШР (X 110)

Результати виконаних досліджень показали, що розмелювання целюлозного волокна до ступеня помелу 65 °ШР (рис. 1, г) сприяє утворенню на поверхні фібрил – тонких волокон, що за структурою нагадують розгалужені волоски. При цьому вони збільшують зовнішню площу поверхні волокон і кількість точок дотику під час формування паперу. Це, у свою чергу, створює сприятливі умови для виникнення водневих зв'язків між волокнами на стадії формування та оброблення паперового полотна.

Разом з тим надмірне розмелювання целюлозних волокон призводить до різкого зниження розмірів волокон та механічної міцності паперу через збільшення в масі кількості дрібних фракцій волокна, що характеризується зниженим ступенем полімеризації та призводить до нерівномірності структури виготовленого паперового полотна.

Для формування оптимального рівня механічної міцності та повітропроникності, а також забезпечення можливості використання паперу як основи для отримання вологоміцних та водонепроникних паперових пакувальних матеріалів, досліджено вплив ступеня помелу целюлозного волокна на властивості матеріалу.

Результати випробувань механічної міцності виготовленого паперу за показником руйнівного зусилля та опору продавлюванню наведено на рис. 2 і 3.

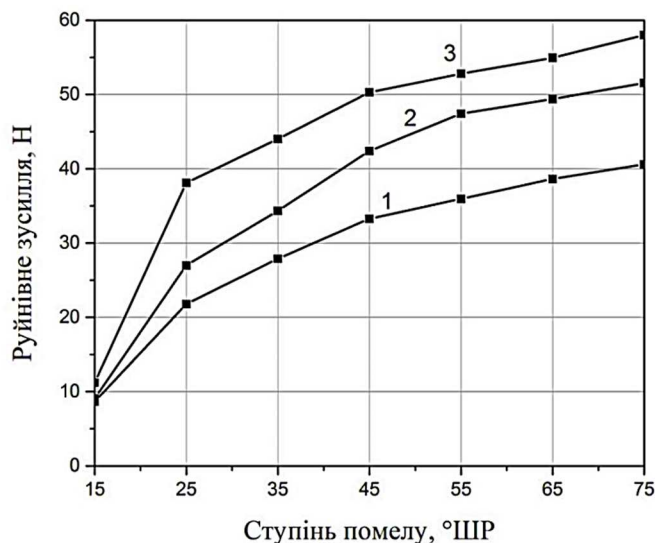


Рис. 2. Вплив ступеня помелу на руйнівне зусилля у сухому стані паперу із різних видів целюлози:

1 – сульфатна листяна небілена; 2 – сульфітна хвойна небілена; 3 – сульфатна хвойна небілена

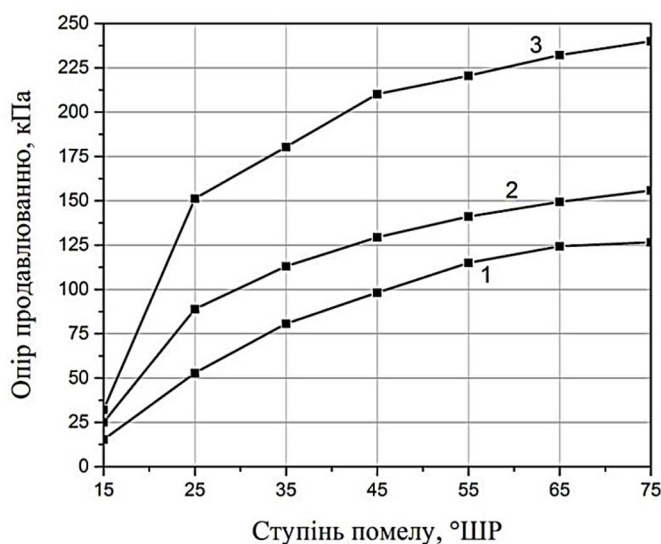


Рис. 3. Вплив ступеня помелу на опір продавлюванню паперу із різних видів целюлози:

1 – сульфатна листяна небілена; 2 – сульфітна хвойна небілена; 3 – сульфатна хвойна небілена

Механічна міцність паперу зростає зі збільшенням ступеня помелу целюлозного волокна. Найбільш інтенсивний (у 4 рази) приріст руйнівного зусилля має місце в діапазоні 15-55 °ШР. За ступеня помелу від 55 до 75 °ШР показник руйнівного зусилля паперу, виготовленого із сульфатної хвойної целюлози, збільшується з 53 до 58 Н. Ступінь помелу вище 65 °ШР не сприяє значному зростанню рівня руйнівного зусилля в машинному напрямі паперу, виготовленого з усіх досліджуваних видів целюлози.

За опором продавлюванню паперу досліджувані зразки демонструють такий же ряд, як і у випадку руйнівного зусилля: сульфатна хвойна целюлоза > сульфітна хвойна целюлоза > сульфатна листяна целюлоза.

Папір, виготовлений із сульфатної листяної целюлози, характеризується більш рівномірним зростанням опору продавлюванню із підвищенням ступеня помелу паперової маси, про що свідчить більш полого крива залежності (1) на рис. 3. Приріст досліджуваного показника за ступеня помелу вище 55 °ШР є суттєво меншим для паперу з усіх видів целюлози.

У діапазоні ступеня помелу з 65 до 75 °ШР показники механічної міцності паперу дещо збільшуються, однак при цьому суттєво зменшується його повітропроникність (рис. 4).

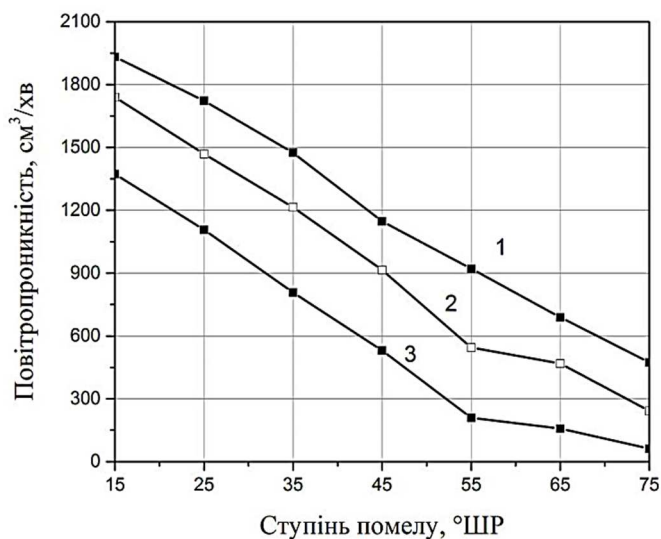


Рис. 4. Вплив ступеня помелу на повітропроникність паперу з різних видів целюлози: 1 – сульфатна листяна небілена; 2 – сульфітна хвойна небілена; 3 – сульфатна хвойна небілена

Повітропроникність паперу, виготовленого з листяної целюлози (1), за однакових ступенів помелу волокна є вищою, ніж паперу із хвойних видів целюлози (2, 3). При цьому папір із нерозмеленої целюлози (15 °ШР) листяної деревини має повітропроникність 1932 см³/хв, що в 1,4 раза більше, ніж у паперу з хвойної сульфатної (1373 см³/хв) та на 11 % вище, ніж у паперу із сульфітної хвойної целюлози (1740 см³/хв).

З підвищенням ступеня помелу повітропроникність зразків паперу значно знижується. Мінімальним значенням повітропроникності відповідає максимальний ступінь помелу, що для паперу з листяної целюлози становить 474 см³/хв, хвойної сульфітної – 242 см³/хв, хвойної сульфатної – 61 см³/хв.

Таким чином, із наведених залежностей можна зробити висновок, що ступінь помелу целюлозного волокна вище за 65 °ШР не сприяє значному зростанню рівня руйнівного зусилля в машинному напрямі, однак значно знижує повітропроникність паперу.

Змінювання довжини волокон сульфітної і сульфатної хвойної та сульфатної листяної целюлози в процесі розмелювання наведено на рис. 5.

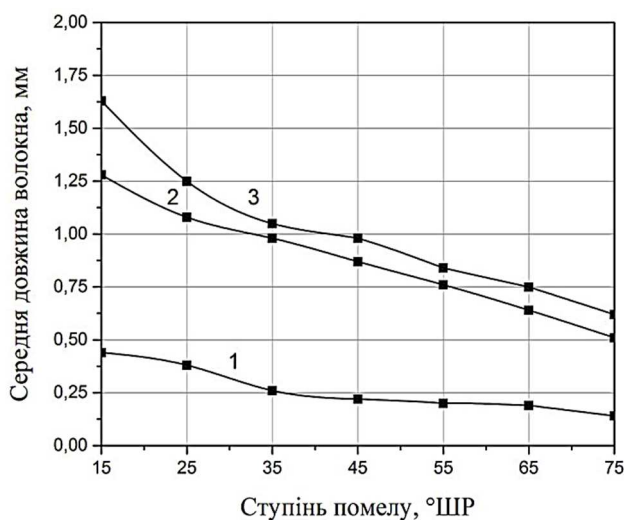


Рис. 5. Залежність довжини волокна целюлози від ступеня помелу: 1 – сульфатна листяна небілена; 2 – сульфітна хвойна небілена; 3 – сульфатна хвойна небілена

Наведені залежності свідчать про кращу здатність до розмелювання волокон хвойної целюлози, що укорочується більше ніж на 46–50 % за ступеня помелу 65 °ШР від початкового стану. На відміну від хвойної целюлози, листяна має набагато меншу початкову довжину волокна, яка в процесі розмелювання зменшується з 0,44 до 0,19 мм, тобто в 2,3 рази, що є небажаним фактором для забезпечення відповідних структури паперу та його властивостей.

Висновки та пропозиції. Результати досліджень дозволяють констатувати, що оптимальний ступінь помелу целюлозних волокон знаходиться в діапазоні 55–65 °ШР. При цьому значну відмінність у показниках механічної міцності та повітропроникності паперу, виготовленого з різних видів целюлози, можна пояснити різною їхньою здатністю до розмелювання, тобто здатністю до укорочення волокна та його фібрилювання.

Значно менша довжина волокна листяної целюлози дає можливість за відповідного співвідношення використовувати її в комбінації з волокнами з хвойної целюлози. При цьому волокна листяної целюлози будуть заповнювати простір між більш довгими волокнами хвойної, що дозволить отримати папір із більш однорідною структурою, підвищеною непрозорістю, стійкістю до деформацій та скручування.

Дослідження характеру розмелювання різних видів целюлози та їхнього впливу на властивості отриманого паперу показало, що папір із сульфитної хвойної целюлози за своїми властивостями значно поступається паперу, виготовленому із сульфатної хвойної, та незначною мірою перевищує за показниками опору продавлюванню та повітропроникності папір із листяної целюлози за інших однакових умов. Враховуючи високу доступність та нижчу вартість листяної целюлози, для виробництва пакувального паперу доцільно використовувати як вихідний волокнистий матеріал композиції сульфатної небіленої хвойної та листяної видів целюлози.

Список використаних джерел

1. Примаков П. С., В. А. Барабаш Технологія паперу і картону. Київ: ЕКМО, 2008. 425 с.
2. Фляте Д. М. Бумагообразующие свойства волокнистых материалов. Москва: Лесная промышленность, 1990. 136 с.
3. Коптюх Л. А. Разработка и организация производства жиронепроницаемой и влагопрочной упаковочной бумаги. *Целлюлоза. Бумага. Картон*. 1997. № 11–12. С. 28–30.
4. Осика В. А., Коптюх Л. А. Паперові пакувальні матеріали: монографія. Київ: КНТЕУ, 2018. 464 с.
5. Вураско А. В., Фролова Е. И. Влияние степени помола на сорбционные свойства целлюлозы из недревесного растительного сырья. *Леса России и хозяйство в них*. 2013. С. 123–126.
6. Карпунин И. И., Кузьмич В. В., Балабанова Т. Ф. Технологические режимы переработки растительного сырья для производства упаковки. *Наука и техника*. 2011. № 3. С. 34–38.
7. Мирзаева М. В., Бабаханова Х. А. Факторы, влияющие на специфические свойства бумаги конкретного назначения. *Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела*. 2013. № 2. С. 13–17.
8. Кулешов А. В., Смолин А. С. Бумагообразующие свойства вторичных растительных волокон. *Химия растительного сырья*. 2008. № 2. С. 110–112.
9. Анализ влипания качества целлюлозного сырья на прочностные и сорбционные свойства упаковочных видов картона / О. А. Мишурина и др. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2017. № 1–1. С. 9–13.
10. Sahin H. T., Arslan M. B. A Study on Physical and Chemical Properties of Cellulose Paper Immerse in Various Solvent Mixtures. *International Journal of Molecular Sciences*. 2008. Vol. 9, Issue 1. P. 78–88.
11. Исследование влияния химического состава целлюлозы на физико–механические свойства бумаги / Э. Р. Муллина и др. *Современные наукоемкие технологии*. 2015. № 9. С. 32–38.
12. Hosoya T., Kawamoto H., Saka S. Cellulose–hemicellulose and cellulose–lignin interaction in wood pyrolysis at gasification temperature. *Journal of analytical and applied pyrolysis*. 2007. Vol. 80, № 1. P. 118–125.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

13. Iwamoto S., Abe K., Yano H. The effect of hemicellulose son wood pulp nanofibrillation and nanofiber network characteristics. *Biomacromolecules*. 2008. Vol. 9, № 3. P. 1022–1026.

14. Characteristics of hemicellulose, cellulose and ligninpyrolysis / Yang H. et al. *Fuel*. 2007. Vol. 86, № 12–13. P. 1781–1788.

15. Влияние условий обработки древесины на молекулярно-массовое распределение целлюлозы в ее составе / Е. В. Калюта и др. *Новые достижения в химии и химической технологии растительного сырья*. 2009. С. 93–95.

References

1. Prymakov, P. S. (2008). *Tekhnolohiia paperu i kartonu [Publishing and editing]*. Kyiv: EKMO [in Ukrainian].

2. Fliate, D. M. (1990). *Bumagoobrazuiushchie svoistva voloknistikh materialov [Publishing and editing]*. Moscow: Lesnaia promyshlennost [in Russian].

3. Koptiukh, L. A. (1997). Razrabotka i organizatsiia proizvodstva zhironpronitcaemoi i vlagoprochnoi upakovochnoi bumagi [Development and organization of production of greaseproof and moisture-proof packaging paper]. *Tcelluloza. Bumaga. Karton – Cellulose. Paper. Cardboard*, 11-12, 28–30 [in Russian].

4. Osyka, V. A. (2018). *Paperovi pakuvalni materialy [Publishing and editing]*. Kyiv: KNUTE [in Ukrainian].

5. Vurasko, A. V. (2013). Vliianie stepeni pomola na sorbtcionnye svoistva tcellulozy iz nedrevesnogo rastitelnogo Syria [The influence of the degree of grinding on the sorption properties of cellulose from non-wood plant materials]. *Les Rossii i khoziaistvo v nikh – Russian forests and farming in them*, 1, 123–126 [in Russian].

6. Karpunin, I. I. (2011). Tekhnologicheskie rezhimy pererabotki rastitelnogo syria dlia proizvodstva upakovki [Technological modes of processing vegetable raw materials for the production of packaging]. *Nauka i tekhnika – Science and technology*, 3, 34–38 [in Russian].

7. Mirzaeva, M. V. Faktory, vliiaiuushchie na spetsificheskie svoistva bumagi konkretnogo naznacheniia [Factors affecting the specific properties of a paper of a specific purpose]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy poligrafii i izdatelskogo dela. – News of higher educational institutions – Problems of printing and publishing*, 2, 13–17 [in Russian].

8. Kuleshov A. V. Bumagoobrazuiushchie svoistva vtorichnykh rastitelnykh volokon [Paper-forming properties of secondary plant fibers]. *Khimiia rastitelnogo syria – Chemistry of plant raw materials*, 2, 110–112 [in Russian].

9. Mishurina, O. A. (2017). Analiz vliipniia kachestva tcelluloznogo syria na prochnostnye i sorbtcionnye svoistva upakovochnykh vidov kartona [Analysis of the influence of the quality of cellulosic raw materials on the strength and sorption properties of packaging types of cardb]. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovanii – International Journal of Applied and Fundamental Research*, 1–1, 9–13 [in Russian].

10. Sahin, H. T. (2008). A Studyon Physicaland Chemical Properties of Cellulose Paper Immerse dinVarious Solvent Mixtures. *International Journal of Molecular Sciences*, 9 (1), 78–88.

11. Mullina, E. R. (2015). Issledovanie vliianiia khimicheskogo sostava tcellulozy na fiziko–mekhanicheskie svoistva bumagi [Study of the influence of the chemical composition of cellulose on the physical and mechanical properties of paper]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii – Modern high technologies*, 9, 32–38 [in Russian].

12. Hosoya, T. (2007). Cellulose–hemicellulose and cellulose–lignin interaction sin wood pyrolysis at gasification temperature. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 1 (80), 118–125.

13. Iwamoto, S. (2008). The effect of hemicellulose son wood pulp nanofibrillation and nanofiber network characteristics. *Biomacromolecules*, 9 (3), 1022–1026.

14. Yang H. etal. (2007). Characteristics of hemicellulose, cellulose and ligninpyrolysis. *Fuel*, 86 (12–13), 1781–1788.

15. Kaluta, Ye. V. (2009). Vliianie ruslovii obrabotki drevesiny na molekuliarno-massovoe raspredelenie tcellulozy v ee sostave [The influence of wood processing conditions on the molecular weight distribution of cellulose in its composition]. *Novye dostizheniia v khimii i khimicheskoi tekhnologii rastitelnogo syria – New advances in chemistry and chemical technology of plant raw materials*, 1, 93–95 [in Russian].

UDC 676.15:676.248

Viktor Osyka, Leonid Koptiukh,
Volodymyr Komakha, Olga Shulga, Kostiantyn Mostyka

PAPER-FORMING PROPERTIES OF CELLULOSE OF DIFFERENT TYPES AND DEGREES OF GRINDER

Urgency of the research. There is a significant number of cellulose grinding schemes affecting on paper properties. In any case, the nature and degree of processing of the fibers in the grinding process is determined primarily by their external surface, namely, the size, morphological structure and structure of the fiber, as well as its plasticity and chemical activity.

Target setting. Under production conditions, the basic properties of paper pulp are estimated on the basis of indirect definitions of quality, namely, the index of the degree of grinding and the average fiber length.

Actual scientific researches and issues analysis. The latest publications on the possibility of obtaining paper with desired properties by developing cellulose fibers at the grinding stage were reviewed.

Uninvestigated parts of general matters defining. The study of the paper-forming properties of cellulose fibers of various origins in a fairly wide range of grinding degree is an actual scientific and practical research for predicting the properties of paper with a given complex of consumer properties.

The research objective. The purpose of the study is to establish the relationship between the degree of fibrillation, shortening of various types of cellulose fiber and the properties of paper obtained from it.

The statement of basic materials. To establish the dependencies, various samples of paper made from various types of softwood and hardwood pulp with varying degrees of grinding were examined.

Conclusions. The research results allow us to state that the optimal degree of grinding of cellulose fibers is in the range of 55–65 ° ShR. At the same time, a significant difference in the mechanical strength and air permeability of paper made from different types of cellulose can be explained by their different ability to grind, that is, to shorten the fiber and fibrillate it.

Keywords: paper properties; softwood pulp; hardwood pulp; paper-forming properties; degree of grinding; average fiber length.

Fig.: 5. References: 15.

Осика Віктор Анатолійович – доктор технічних наук, доцент, декан факультету торгівлі та маркетингу, Київський національний торговельно-економічний університет (вул. Кіото 19, м. Київ, 02156, Україна).

Osyka Victor – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Deen of Trade and Marketing Faculty, Kyiv National University of Trade and Economics (19 Kioto Str., 02156 Kyiv, Ukraine).

E-mail: osyka@knteu.kiev.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5081-7727>

Коптюх Леонід Андрійович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри товарознавства та митної справи, Київський національний торговельно-економічний університет (вул. Кіото 19, м. Київ, 02156, Україна).

Koptiukh Leonid – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor in the Department of Commodity Science and Customs Affairs, Kyiv National University of Trade and Economics (19 Kioto Str., 02156 Kyiv, Ukraine).

E-mail: neprod3@knteu.kiev.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6205-6120>

Комаха Володимир Олександрович – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри товарознавства та митної справи, Київський національний торговельно-економічний університет (вул. Кіото 19, м. Київ, 02156, Україна).

Komakha Volodymyr – PhD in Technical Sciences, Senior lecturer in the Department of Commodity Science and Customs Affairs, Kyiv National University of Trade and Economics (19 Kioto Str., 02156 Kyiv, Ukraine).

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6498-9047>

Шульга Ольга Сергіївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри товарознавства та митної справи, Київський національний торговельно-економічний університет (вул. Кіото 19, м. Київ, 02156, Україна).

Shulga Olga – PhD in Technical Sciences, Associate Professor in the Department of Commodity Science and Customs Affairs, Kyiv National University of Trade and Economics (19 Kioto Str., 02156 Kyiv, Ukraine).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0312-890X>

Мостика Костянтин Вікторович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри товарознавства, управління безпечністю та якістю, Київський національний торговельно-економічний університет (вул. Кіото 19, м. Київ, 02156, Україна).

Mostyka Kostiantyn – PhD in technical sciences, docent, Associate Professor in the Department of Commodity Science, Safety and Quality Management, Kyiv National University of Trade and Economics (19 Kioto Str., 02156 Kyiv, Ukraine).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6165-6463>

Каріна Паламарек

ВИКОРИСТАННЯ РОЗРОБЛЕНИХ ОВОЧЕВИХ ПАСТ ІЗ ЙОДОВМІСНОЮ СИРОВИНОЮ В ТЕХНОЛОГІЇ РУЛЕТІВ З ОВОЧЕВИМИ НАЧИНКАМИ

Актуальність теми дослідження. Дослідження продукцію з підвищеним вмістом біодоступного йоду є актуальним завданням сучасного етапу розвитку харчової промисловості, у вирішенні якого важливу роль відіграють дослідження, спрямовані на подальше впровадження прогресивних способів виробництва овочевих паст з йодовмісною сировиною.

Постановка проблеми. Для профілактики захворювань, зумовлених дефіцитом йоду, перспективним є підвищення його вмісту в харчових продуктах унаслідок комплексного використання дієтичних добавок, харчової сировини і функціональних інгредієнтів, в яких йод перебуває в органічно зв'язаному стані та в сукупності зі своїми синергістами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Були розглянуті як класичні роботи, так і сучасні публікації у вітчизняних та закордонних джерелах, що відповідають цій проблемі.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Створення кулінарної продукції, в яких йод перебуває в органічно зв'язаному стані та в сукупності зі своїми синергістами.

Постановка завдання. Розроблення технології та проведення медико-біологічної апробації розробленої кулінарної продукції, в яких йод перебуває в органічно зв'язаному стані та в сукупності зі своїми синергістами, що забезпечує високі споживчі властивості готової продукції, та в яких вміст йоду після теплової обробки забезпечуватиме добову потребу в ньому.

Виклад основного матеріалу. Експериментальними дослідженнями встановлено збільшення вмісту йоду після теплової обробки в овочевих пастах. Розроблено технологію нових рулетів з овочевими пастами та досліджено їхню якість. Проведена медико-біологічна апробація розроблених рулетів із використанням овочевих паст із йодовмісною сировиною.

Висновки відповідно до статті. Визначено, що вміст йоду в овочевих пастах після термічної обробки зменшується в них на 49,3 %. Отже, втрати йоду під час термічної обробки значні, але кінцевий результат є достатнім для забезпечення добової потреби в йоді на 65 %. Встановлено, що двотижневого додаткового вживання рулетів виявляється достатнім для покращення йодного забезпечення організму обстежених пацієнтів, про що свідчить збільшення сироваткового вмісту йоду на 12,6 % та зростання на 15,1 % показника йодурії.

Ключові слова: овочеві паста з йодовмісною сировиною; нутрієнти-синергісти; профілактика йододефіциту; концентрація; каппа-карагенан; рулети з овочевими начинками; йододефіцитні стани.

Рис.: 3. Табл.: 1. Бібл.: 21.

Актуальність теми дослідження. На сьогодні структура харчування населення має суттєві відхилення від формули збалансованого харчування за рівнем споживання вітамінів, мінеральних речовин, зокрема йоду, що зумовлює формування факторів ризику для розвитку аліментарних і аліментарнозалежних захворювань.

Постановка проблеми. Для профілактики захворювань, зумовлених дефіцитом йоду, перспективним є підвищення його вмісту в харчових продуктах унаслідок комплексного використання дієтичних добавок, харчової сировини і функціональних інгредієнтів, в яких йод перебуває в органічно зв'язаному стані та в сукупності зі своїми синергістами.

У зв'язку з вищевикладеним, важливе значення набуває створення нової кулінарної продукції з підвищеним вмістом біодоступного йоду, яка передбачатиме використання йодовмісної сировини та інших фізіологічно-функціональних інгредієнтів з певними біологічно-функціональними властивостями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як закордонна, так і вітчизняна практика свідчить про те, що крім масового йодування солі, існує ще і збагачення йодом багатьох харчових продуктів та сировини. Незважаючи на існування на ринку різних продуктів із вмістом йоду, йодний дефіцит існує.

Використанню йодовмісної сировини у харчуванні людей присвячені роботи багатьох вітчизняних та закордонних учених. Під час патентного пошуку та перегляду аналітичної літератури, було знайдено відомості щодо розробки з йодуванням масла, молочних продуктів, плавлених сирів, борошна, дріжджів, кондитерських та м'ясних виробів [1-4].

До недоліків відомих способів належить те, що йод у них знаходиться як компонент механічної суміші, а не в зв'язаному стані з компонентами продукту. А включення йоду в живильне середовище для росту дріжджів може змінити їх метаболізм.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проблеми йододефіциту і розроблення напрямів його профілактики, зокрема шляхом створення нових харчових

продуктів із підвищеним вмістом йоду потребує подальшого вивчення та вдосконалення, що обумовлює доцільність проведення подальших досліджень, спрямованих на поліпшення харчування сучасної людини.

Доступні за ціною політикою для масового споживача натуральні плодоовочеві продукти, серед яких фруктові та овочеві пасти, які використовують як наповнювачі, згущувачі, як окремі страви (закусочні пасти) обмежені асортиментом, харчова цінність яких невисока. Вони характеризуються високим вмістом харчових волокон на фоні низького вмісту білків, мінеральних елементів та вітамінів. У зв'язку із цим визначено доцільність розширення асортименту доступної пастоподібної комбінованої продукції із сумісним використанням йодовмісної, овочевої та молочної сировини.

Постановка завдання. Розроблення технології та проведення медико-біологічної апробації розроблених рулетів із використанням овочевих паст із йодовмісною сировиною, що має забезпечувати високі споживні властивості готової продукції, дасть змогу наблизити вирішення проблеми дефіциту йоду та його синергістів.

Виклад основного матеріалу. На основі серії попередніх досліджень і з урахуванням даних, що містяться в науково-технічній літературі, було обґрунтовано й розроблено інгредієнтний склад овочевих паст з підвищеним вмістом йоду та нутрієнтів-синергістів на основі використання білкової і рослинної сировини [5-9].

Використання овочевих паст із йодовмісною сировиною у виробництві кулінарної продукції здійснюється за скороченою технологічною схемою, що передбачає введення овочевих паст до страви у вигляді начинки, формування, теплової обробки, порціонування, оформлення та реалізацію.

Консистенція розроблених овочевих паст дає нам змогу використовувати їх для приготування бутербродів, оздоблення бенкетних холодних закусок, як фарші й начинки для сирних, картопляних рулетів, борошняних виробів та ін.

Метою технологічних досліджень є приблизне задоволення потреб харчування ендемічного населення до норм величин нутрієнтів та синергістів йоду. При розрахунках оптимального інгредієнтного складу готової до вживання кулінарної продукції враховувались довідкові величини вмісту цих нутрієнтів-синергістів у початковій сировині, а також норм та втрат при відповідних видах кулінарної обробки і зберіганні готової страви в холодному вигляді [10-13].

Інгредієнти оптимізованих рецептур страв піддавались технологічній обробці в послідовності, адекватній виду початкової сировини. Технологічний регламент включає рецептуру, норми втрат при кулінарній обробці, технологію приготування, відпуск, показники органолептичної оцінки, необхідність та потребу вживання людям, які проживають на ендемічній території.

Однією з найбільш популярних видів кулінарної продукції нині є закубочні рулети з різними начинками. З огляду на вищезазначене та з урахуванням наявності певного попиту на кулінарну продукцію з підвищеним вмістом біологічно-активних речовин з відносно не великою собівартістю, нами було розроблено рецептури і технологічні схеми виробництва рулетів із використанням розроблених овочевих паст з йодовмісною сировиною.

З метою розроблення технології рулетів із використанням розроблених овочевих паст із йодовмісною сировиною було розроблено бальну шкалу оцінки органолептичних властивостей, досліджено основні функціонально-технологічні властивості сировинних інгредієнтів і модельних композицій рулетів, що забезпечують заданий рівень якості цього виду продукції [9; 14]. За попередньо спроектованим інгредієнтним складом частка рослинного фаршу (у вигляді паст) у модельних композиціях рулетів становить 33...41 %, що визначає доцільність використання діючих технологічних інструкцій для виробництва закубочних рулетів із начинкою [5].

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

В основу нашої розробки поставлено завдання створення сирної рулетної основи, яка сприятиме збереженню цілісності поверхні рулету та покращуватиме органолептичні якості готової страви.

Під час дослідження технологічних параметрів рулетів із використанням розроблених овочевих паст із йодовмісною сировиною було встановлено, що фарш (овочева паста) не був стійким при тепловій обробці рулету, і навіть після його охолодження. Під час порціонування рулету начинка не набувала стійкої форми, а яєчно-сирна основа рулету набувала колір пасти. Це надавало рулетам поганого естетичного вигляду, незручності при нарізанні, транспортуванні та зберіганні.

Тому для забезпечення кращих органолептичних показників рулетів нами було встановлено, що є необхідність у додаванні до начинки структуроутворювача.

Як структуроутворювач у складі харчових продуктів можуть використовуватися пектинові речовини, крохмаль, геміцелюлоза, агар-агар, карагенан та ін.

Відомий харчовий структуроутворювач, який містить низькометоксилірований або високометоксилірований пектин [15]. Недоліком такого структуроутворювача є низька структуроутворююча або детоксикаційна властивість. Кращим від попереднього є харчовий структуроутворювач, який містить низькометоксилірований пектин і хітозан [16]. Така композиція поєднує високу структуроутворюючу і детоксикаційну властивість, є термостабільною, але не володіє високою желуючою властивістю.

Карагенан – широко використовується в харчовій промисловості як желуючий агент, згущувач та стабілізатор.

Каппа-карагенан – розчиняється в гарячій воді (70–80 °С). Він не розчинний у холодній воді, крім як у розчині з натрієм. Після розчинення і подальшого охолодження каппа-карагенан дає тверді, термовідновлюючі гелі з високою міцністю студня.

Йота-карагенан утворює менш міцні гелі, ніж каппа, але вони більш еластичні.

Лямбда-карагенан, завдяки вмісту великої кількості сульфо-груп, не утворює гелі. Але він утворює розчини високої в'язкості. Тому ця фракція підходить для пін, емульсій і суспензій.

На основі вищевикладених аналітичних досліджень нами було обрано каппа-карагенан. Його ефективне використання пов'язане з можливістю додавання у сухому вигляді і при цьому утворювати міцну структуру після охолодження.

При відпрацюванні технології рулетів додавали до овочевої пасти-начинки структуроутворювач каппа-карагенан.

Застосування каппа-карагенану у виробництві рулетів дає можливість:

- підвищити вихід рулетів;
- поліпшити органолептичні показники (соковитість, консистенцію, колір, зовнішній вигляд, нарізування);
- виключити ймовірність утворення при термічній обробці бульйонно-жирових набряків;
- стабілізувати зовнішній вигляд продукту при його зберіганні у вакуум-упаковці завдяки зниженню ефекту відділення вологи (синерезис).

Використання карагенану не вимагає додаткового устаткування і зміни стандартного технологічного процесу.

Введення карагенану в начинку рулетів здійснюють у сухому (порошкоподібному) вигляді. При виготовленні овочевих паст, для начинки рулету, карагенан додаємо у сухому вигляді на етапі перемішування.

З метою визначення впливу каппа-карагенану на структурно-механічні властивості овочевої пасти з йодовмісною сировиною проведені експериментальні проробки модельних композицій овочевих паст із додаванням каппа-карагенану в кількості від 0 до 3,0 % до маси начинки, оскільки додавання більшої кількості каппа-карагенану значно погіршує органолептичні показники якості начинки (начинка набуває солонуватого присмаку).

Для визначення раціональної кількості каппа-карагенану використовували математичний метод, де за критерій оптимізації був прийнятий комплексний показник якості (КПЯ). Цей показник охоплював такі властивості: органолептичну оцінку, щільність, ефективну в'язкість, адгезійну здатність.

Шляхом математичної обробки експериментальних даних визначено рівняння регресії, які описують однофакторний простір залежності КПЯ від концентрації каппа-карагенану в овочевих пастах (рис. 1).

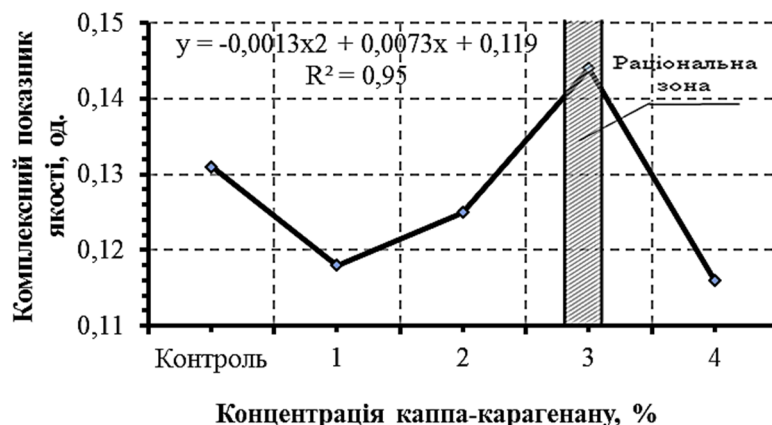


Рис. 1. Раціональний вміст каппа-карагенану, %

Так, збільшення вмісту каппа-карагенану понад 3 % погіршувало смак і консистенцію паст. Графічна залежність комплексного показника якості від концентрації каппа-карагенану графічно зображено на рис. 1.

Залежність між концентрацією каппа-карагенану й комплексним показником якості описується таким рівнянням:

$$Y = -0,0013x^2 + 0,0073x + 0,119,$$

де x – концентрація каппа-карагенану, %;

Y – комплексний показник якості паст, од.

Звідси визначаємо точку екстремуму даної функції:

$$\max\{-0,0013x^2 + 0,0073x + 0,119\} = \frac{67209}{520000} \text{ at } x = \frac{73}{26}.$$

$$Y (\max) = 2,80.$$

Отже, раціональний вміст каппа-карагенану становить 3,0 %.

Наступним етапом ми визначали залежність граничного напруження зсуву (ГНЗ) овочевих паст від температури нагрівання (рис. 2).

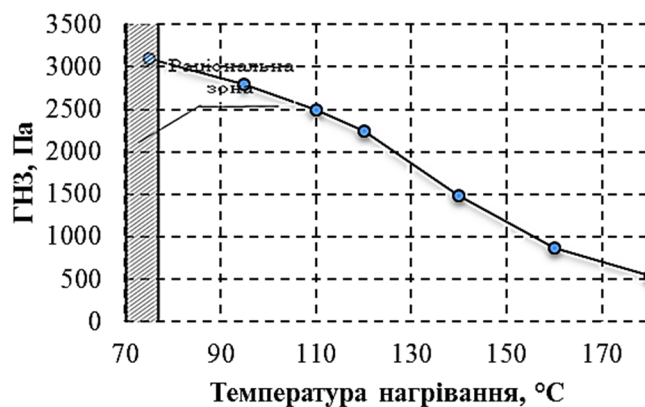


Рис. 2. Граничне напруження зсуву овочевих паст від температури нагрівання

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

З отриманих даних (рис. 2) можна зробити висновок, що з підвищенням температури нагрівання компонентів ГНЗ зменшується, тобто консистенція та текстура продукту стають менш щільними, що зумовлено послабленням структури пасти за рахунок вмісту каппа-карагенану, який при нагріванні стає нестійким. Відповідно, при охолодженні овочевих паст граничне напруження зсуву буде зростати, тому що каппа-карагенан повністю розчиняється й утворює міцний гель при охолодженні (температура охолодження (65...75 °С) нижче температури плавлення/розчинення карагенану). Отже, температура охолодження (подачі) становить 65...75 °С.

Ще одним із головних наших завдань є визначення вмісту йоду після теплової обробки в овочевих пастах.

Під час проведення дослідження на вміст йоду в овочевих пастах після термічної обробки встановлено, що йод зменшується в них на 49,3 %. Таким чином, втрати йоду під час термічної обробки значні, але кінцевий результат є достатнім для забезпечення добової потреби в йоді на 65 %. Це дозволяє рекомендувати кулінарну продукцію для вживання з метою профілактики йододефіцитних захворювань.

Результати експериментальних досліджень лягли в основу розробки рецептур і технологічних схем виробництва рулетів із використанням розроблених овочевих паст із йодовмісною сировиною (рис. 3).

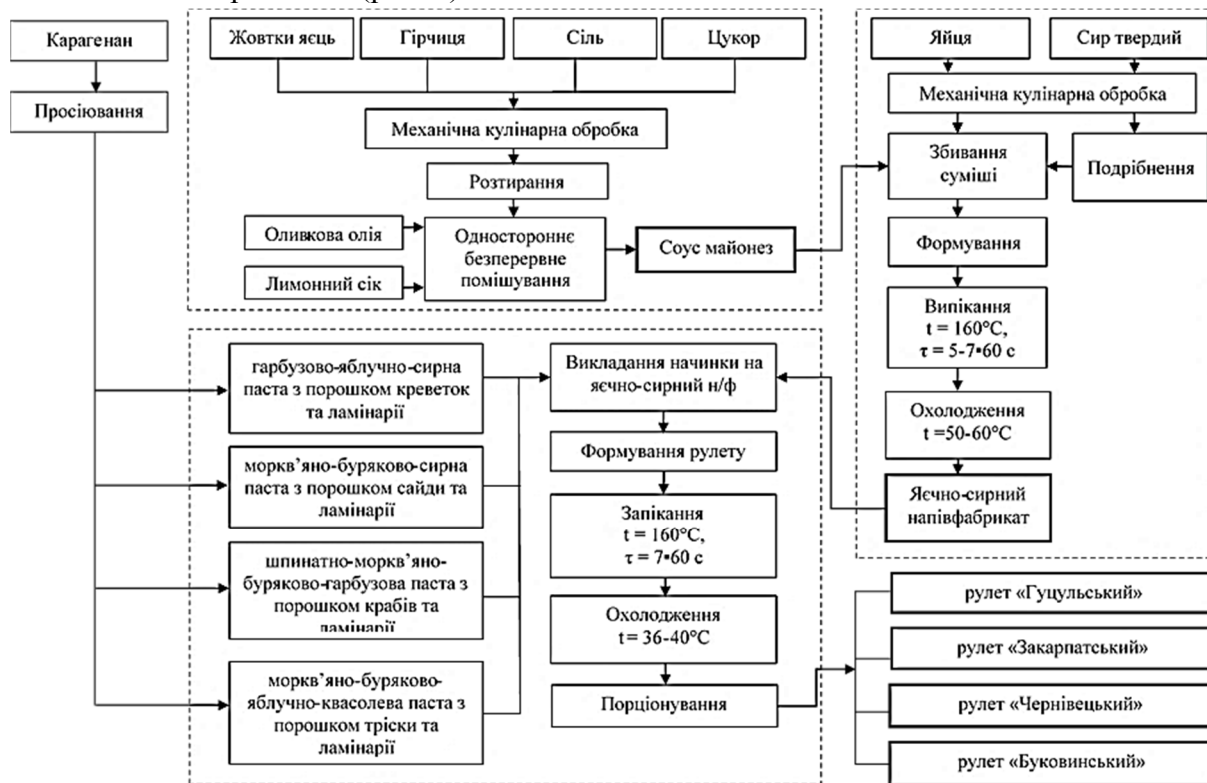


Рис. 3. Загальна схема виробництва рулетів із використанням розроблених овочевих паст із йодовмісною сировиною

Проведені дослідження дозволили розробити рецептурний склад та технологічний процес одержання рулетів з овочевою пастою з йодовмісною сировиною, який закріплено в затверджених технічних умовах: ТУ У 10.8-05476322-002:2013 «Вироби кулінарні. Рулети з овочевими начинками» та технологічна інструкція до ТУ У 15.8-32214657-003:2010 «Вироби кулінарні. Рулети з овочевими начинками».

З метою медико-біологічного випробування ефективності застосування рулетів з використанням розроблених овочевих паст зі збалансованим складом поживних речовин та підвищеним вмістом йоду в програмі профілактики та лікування йододефіцит-

них станів було обстежено 20 жителів Чернівецької області, яку поряд із Волинською, Закарпатською, Івано-Франківською, Львівською, Рівненською та Тернопільською областями віднесено до регіонів із вираженим дефіцитом йоду та максимальними ризиками розвитку йододефіцитних захворювань [17].

Обстежуваний контингент становили пацієнти віком від 31 до 60 років (середній вік – $(48,80 \pm 1,30)$ років), 55 % яких (11 осіб) були жінки та 45 % (9 обстежених) – чоловіки. Зазначена гендерна та вікова репрезентативність групи обстеження узгоджується з літературними відомостями про те, що йододефіцитні стани можуть розвиватися в будь-якому віці, їх частота не пов'язана зі статтю або расовою належністю [18].

Дослідження проводилося на тлі тривалого щоденного прийому обстеженими особами лікарських препаратів, що забезпечують надходження фізіологічної кількості йоду (йодид калію) з метою подолання його недостатності в харчуванні. Дозування медикаментозних засобів, що містять фіксовану добову концентрацію йоду, здійснювалося з урахуванням рекомендацій Експертної групи ВООЗ і ЮНІСЕФ 2007 р. [17; 18; 19].

Під час звернення до Чернівецького обласного клінічного ендокринологічного центру всім обстеженим проводили стандартне загальноклінічне комплексне обстеження (опитування, фізикальне обстеження, лабораторно-інструментальні дослідження тощо), спрямоване на встановлення характеру та оцінки тяжкості йододефіцитного захворювання згідно з критеріями й рекомендаціями, запропонованими ВООЗ/ЮНІСЕФ/ISCID [20]. Рекомендована програма верифікації йододефіцитного стану обов'язково включає визначення розмірів та структури щитоподібної залози, що зазвичай здійснюється методом її пальпації і/або УЗ-дослідження, а також виявлення біохімічних маркерів йододефіциту шляхом визначення концентрації тиреоїдних гормонів, тиреотропного гормону (ТТГ), тиреоглобуліну (ТГ) у крові, вміст йоду в сечі. Трьома найбільш практичними способами оцінки йодної недостатності вважають визначення розмірів ЩЗ (пальпаторним методом чи за допомогою УЗД), визначення йоду в сечі і визначення рівня тиреоглобуліну в сироватці крові і, як стверджують експерти, з метою встановлення ступеня тяжкості йодного дефіциту слід оцінити принаймні два із зазначених у рекомендаціях параметри. Разом з тим з метою контролю за ефективністю заходів щодо ліквідації йододефіцитних захворювань та їх наслідків, ми вважали за необхідне переглянути перелік застосованих методів діагностики. Так, використання результатів пальпаторного дослідження ЩЗ як індикатора ефективності застосування рулетів з овочевими пастами з йодовмісною сировиною в раціоні обстежених хворих унеможлиблюється з огляду на те, що зоб (збільшення розмірів щитоподібної залози) – не єдиний наслідок дефіциту йоду в організмі. Крім тиреоїдних проявів йододефіциту, є ще багато дисфункцій, які можуть проявлятися у формі вроджених вад, антенатальної загибелі плода, викиднів, порушення формування та функції нервової системи тощо [16; 17; 18].

Більше того, розміри ЩЗ залишаються стабільними впродовж багатьох місяців, а тривало існуючий зоб у дорослих осіб (особливо за наявності в ньому вузлів) може взагалі не зменшуватися в розмірах навіть за повної нормалізації рівня забезпеченості організму йодом. Крім того, пальпація щитоподібної залози зберігає своє діагностичне значення за наявності зобів великих розмірів, проте вона істотно менш надійна, коли щитоподібна залоза має невеликі розміри. Оскільки у зв'язку з йодною профілактикою об'єм щитоподібної залози зменшується, діагностична специфічність і надійність пальпаторних досліджень стає дедалі меншою у групі осіб, що до включення у дослідну програму певний час вже отримували йодовмісні препарати. Незважаючи на переваги пальпації при скринінгових обстеженнях (простота, доступність, швидкість виконання, відсутність необхідності в спеціальній апаратурі й додаткових витратах), неможливо заперечити суб'єктивізм цього методу

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

через значну кількість варіацій між його результатами, отриманими різними дослідниками (розбіжності та незбіг можуть перевищувати 40 %) [18].

Подібні обмеження слід взяти до уваги й у випадку УЗ-досліджень ЩЗ: незважаючи на можливість застосування на різних стадіях захворювання, високу інформативність щодо морфологічних характеристик ЩЗ (об'єм, виявлення вузлів, кіст, кальцифікатів, абсцесів та їхніх розмірів), властивостей її структури та кровопостачання (доплерографія), епідеміологічна чутливість цього методу дослідження стосується лише тиреоїдних проявів йододефіциту, а іноді зовсім не пов'язаних з ним, що примушує відносити його до додаткових методів комплексного обстеження, а отримані результати оцінювати у сукупності з іншими тестами [18; 19].

З практичного погляду, рівень ТТГ та тиреоїдних гормонів у сироватці можуть істотно варіювати, оскільки порушення функції щитоподібної залози внаслідок наявності йодного дефіциту можуть бути у вигляді як зниження, так і підвищення її функціональної активності, а сама діагностична процедура пов'язана із суттєвими труднощами та затратами [18].

Метод визначення концентрації йоду в сечі, рекомендований ВООЗ для використання в епідеміологічних дослідженнях, на нашу думку, є найбільш адекватним поставленим у нашому дослідженні завданням: оскільки основна частина йоду (~90 %) екскретується через нирки, концентрація йоду в сечі може слугувати діагностичним (епідеміологічним) маркером індивідуальної забезпеченості організму йодом. Хоча результати визначення у різних осіб можуть залежати від споживання ними рідини, а кількість йоду змінюється день від дня і впродовж доби, висока чутливість і специфічність реакції визначення концентрації йоду у сечі, як засвідчили чисельні дослідження, може відображати рівень споживання цього мікронутрієнту [16; 17; 18]. Крім того, за рівнем йоду в сечі можна вже через декілька днів оцінити ефект корекції йодної недостатності, що найбільш влучно відповідає методології та дизайну нашого дослідження.

З огляду на вищевказане, до групи обстеження увійшли особи без порушення розмірів, структури (без зобу) та функції щитоподібної залози (стан еутиреозу). Проявами йодної недостатності в них були:

- психоемоційні симптоми: різке зниження фізичної й розумової працездатності, швидка втомлюваність, сонливість, млявість, дратівливість, пригнічений настрій, періодичні напади немотивованої туги, погіршення пам'яті й уваги, часті головні болі;
- симптоми обмінних порушень: сухість шкіри, випадіння волосся, зниження температури тіла, мерзлякуватість навіть влітку, набряки (загальні або набряклість обличчя) без відчутного ефекту систематичного прийому сечогінних препаратів, надмірна вага або ожиріння;
- кардіологічні симптоми: атеросклероз, стійкий до лікування дієюю і ліками, аритмії без відчутного тривалого ефекту протиаритмічних засобів;
- анемічні симптоми: зниження рівня гемоглобіну в крові з незначною ефективністю курсів лікування препаратами заліза;
- імунодефіцитні симптоми: часті інфекційні й простудні захворювання;
- ознаки дисфункції опорно-рухового апарату: слабкість і періодичні м'язові болі (міалгії) в кінцівках, грудний та поперековий радикуліт із низькою ефективністю традиційного лікування;
- бронхо-легеневі симптоми: часті респіраторні захворювання та резистентний до лікування хронічний бронхіт;
- ознаки дисфункції шлунково-кишкового тракту: закрепи, дисбактеріоз;
- гінекологічні: порушення менструального циклу та інші симптоми.

Як до, так і після додаткового двотижневого вживання пацієнтами групи обстеження 100 г рулетів зі збалансованим складом поживних речовин та підвищеним вмістом йоду, проводилося визначення концентрації йоду в сироватці крові обстежених та у до-

бовій сечі (згідно з реакцією Sandell-Kolthoff) [19; 20] у Німецько-Українській лабораторії ТОВ «БУКІНТЕРМЕД» (м. Чернівці, Україна). Відсутність нестачі йоду в організмі встановлювали при концентрації йоду в сечі $>150 \mu\text{g/g}$ креатиніну; 0–I ступінь нестачі йоду при його концентрації $100\text{--}150 \mu\text{g/g}$ креатиніну; I, II та III ступінь йододефіциту – при рівнях йодурії відповідно $50\text{--}100$, $25\text{--}50$ та $<25 \mu\text{g/g}$ креатиніну. Для аналізу результатів дослідження, окрім показника середньої арифметичної йодурії, використовували й медіану концентрації йоду в сечі (у нормі медіана екскреції йоду з сечею повинна перевищувати 100 мкг/л).

Одержані дані опрацьовані методами варіаційного статистичного аналізу з визначенням парного критерію Стьюдента за програмою «Biostat» (таблиця).

Таблиця 3

Показники вмісту йоду в сироватці крові та сечі жителів Чернівецької області залежно від вживання розроблених рулетів з використанням овочевих паст з йодовмісною сировиною протягом 14 днів ($M \pm m$)

Показник	Обстежені пацієнти, n=20	
	до вживання рулетів	після вживання рулетів
Вміст йоду в сироватці крові, $\mu\text{g/l}$	$45,23 \pm 1,01$	$50,92 \pm 0,60^*$
Вміст йоду в добовій сечі, $\mu\text{g/g}$ креатиніну	$103,34 \pm 1,59$	$118,92 \pm 1,41^*$
Медіана йодурії, $\mu\text{g/g}$ креатиніну	103,43	118,79

Примітки: n – кількість спостережень;

$P < 0,001$ – ступінь вірогідності різниць показників до та після лікування.

До прийому рулетів вміст йоду в добовій сечі обстежених, незважаючи на прийом йодовмісних препаратів, не досягав рівня 150 мкг/г креатиніну, засвідчуючи 0–I ступінь нестачі йоду в організмі пацієнтів; в окремих випадках (30 % обстежених) встановлено I ступінь тяжкості йододефіциту за рівнем добової йодурії. Медіана йодурії обстежених осіб лише на $3,43 \text{ мкг/г}$ креатиніну перевищувала гранично допустиму норму за даним показником, корелюючи зі зменшеним вмістом йоду й у сироватці крові пацієнтів (референтні значення згідно з цією методикою дослідження – $46\text{--}70 \text{ мкг/л}$). Серед можливих причин виявлених змін можна виокремити нетривале чи нерегулярне застосування препаратів йоду, самовільна корекція дози препаратів без узгодження з лікарем-практиком тощо.

Як підтверджують результати наших досліджень, двотижневого додаткового вживання рулетів виявилось достатньо для покращення йодного забезпечення організму обстежених пацієнтів, про що свідчить збільшення сироваткового вмісту йоду на 12,6 % та зростання на 15,1 % показника йодурії. Водночас це супроводжувалося клінічними ознаками усунення йододефіциту – зменшенням частоти або зникненням вищенаведених симптомів захворювань, покращенням та нормалізацією показників функції органів та систем. Ймовірно, крім споживання необхідної для організму кількості йоду, який завдяки специфічній кулінарній обробці продуктів харчування незмінно зберігається в рулетах, додаткове їх застосування на тлі прийому йодовмісних препаратів сприяє кращому засвоєнню йодиду калію, що міститься у складі останніх, прокращуючи його всмоктування у ШКТ.

Висновки відповідно до статті. Таким чином, нами засвідчена висока ефективність використання рулетів зі збалансованим складом поживних речовин та підвищеним вмістом йоду з метою усунення проявів йододефіциту в осіб, що проживають в ендемічній місцевості. Широке трактування проблеми йодного дефіциту підтверджує необхідність залучення до поглиблених досліджень захворювань, спричинених нестачею йоду, не лише ендокринологів, але й лікарів інших спеціальностей, а також спеціалістів у галузі харчування і харчової промисловості.

Список використаних джерел

1. Щеплягина Л. А. В XX веке без йодного дефицита. Программа действий для правительственных и неправительственных организаций. *Здоровье для всех – Все для здоровья в России (Серия докладов по политике в области охраны здоровья населения)*. 2000. № 6. С. 119–122.
2. Еколого-гігієнічні проблеми харчування населення північних регіонів України / В. Н. Корзун та ін. *Гігієна населених місць*. 2003. Вип. 42. С. 442–448.
3. Пищевая добавка йод-актив в профилактике и лечении эндемического зоба: материалы межрегионального семинара / Н. А. Беляева и др. *Методология разработки и реализации региональных программ “Здоровое питание”*. Тверь, 2001. С. 110–113.
4. Румянцева В. В., Корячкина С. Я. Зефир специального назначения (йодирование зефира с добавкой порошка ламинарии). *Пищевая технология*. 2000. № 2, 3. С. 46–48.
5. Паламарек К. В., Пересічний М. І. Проектування білково-рослинних паст з підвищеним вмістом йоду. *Обладнання та технології харчових виробництв*: темат. зб. наук. пр. Донецьк: ДонНУЕТ ім. М. Туган-Барановського, 2013. Вип. 30. С. 135–143.
6. Паламарек К. В., Пересічний М. І. Мінеральний та вітамінний склад сирно-рослинних паст з підвищеним вмістом йоду. *Товари і ринки*. 2013. № 2 (16). С. 125–131.
7. Паламарек К. В., Романенко Р. П. Структурно-механічні властивості овочевих паст з використанням йодовмісної сировини. *Сборник научных трудов SWorld*. 2013. Вип. 4, т. 14. С. 44–49.
8. Паламарек К. В., Корзун В. Н. Масова концентрація йоду в овочево-яєчних пастах. *Харчова наука і технологія*. 2014. № 2 (27). С. 10–14.
9. Паламарек К. В., Пересічний М. І. Оптимізація рецептурного складу овочевих паст з йодовмісною сировиною. *Технологічний аудит та резерви виробництва*. 2016. № 2/4 (28). С. 11–17.
10. Скурихин И. М. Химический состав блюд и кулинарных изделий. Справочные таблицы содержания основных пищевых веществ и энергетической ценности блюд и кулинарных изделий: в 2 т. / под ред. И. М. Скурихина, М. И. Волгарева. Москва, 1994. Т. 2. 304 с.
11. Скурихин И. М. Химический состав блюд и кулинарных изделий. Справочные таблицы содержания основных пищевых веществ и энергетической ценности блюд и кулинарных изделий: в 2 т. / под ред. И. М. Скурихина, М. Н. Волгарева. Москва: ВИНТИ, 1994. Т. 1. 464 с.
12. Скурихин И. М., Тутельяна В. А. Состав Российских пищевых продуктов: справочник / под ред. И. М. Скурихина. Москва: ДеЛи, 2002. 236 с.
13. Эрл, М. Справочник по витаминам и минеральным веществам. Москва: Медицина и питание, 2000. 392 с.
14. Palamarek K. V. Investigation of hydration and formation of structural-mechanical properties of vegetable paste with iodine-containing raw material. *Technology audit and production reserves*. 2017. № 6/3 (38). P. 63–70.
15. Голубев В. Н., Шелухина Н. П. Пектин: химия, технология, применение. Москва: ИЭЧ АТН РФ, 1995. С. 338–355.
16. Пат. 2195133 Россия, А.с. 2148365, А 23 L 1/0524 Пищевой структурообразователь / В. П. Гранатова, Г. И. Касьянов, О. И. Квасенков. заявитель и патентообладатель : Кубанский государственный технологический университет; заявл. 30.07.99; опубл. 10.05.2000, Бюл. 13.
17. Оленович О. А. Дефіцит йоду – наслідки для здоров'я людини та шляхи попередження. *Молодий Буковинець*. 2014. № 23.
18. Камінський О. В., Афанасьєв Д. Є., Коваленко О. М. Стандарти надання медичної допомоги хворим з патологічними станами щитоподібної залози в умовах дії негативних чинників довкілля: метод. посіб. Київ: ТОВ «День Печати», 2012. 164 с.
19. WHO/NUT Indicators for assessing Iodine Deficiency Disorders and their control through salt iodization. World Health Organization, United Nations Children's Fund, International Council for Control of Iodine Deficiency Disorders. WHO/NUT/94.6. Geneva: WHO, 1994. P. 1–55.
20. Sandell E. B., Kolthoff I. M. Chronometric catalytic Method for the Determination of micro Quantities of Jodine. *J. Am. Chem. Soc.* 1984. Vol. 56. 1426 p.
21. Яцимирский К. Б. Кинетические методы анализа. Москва: Химия, 1967. 204 с.

References

1. Scheplyagina, L. A. (2000). V XX veke bez yodnogo defitsita. Programma deystviy dlya pravitelstvennyih i nepravitelstvennyih organizatsiy [In the twentieth century without iodine deficiency.

Action Program for Governmental and Non-Governmental Organizations]. *Zdorove dlia vseh – Vse dlia zdorovya v Rossii (Seriiia dokladov po politike v oblasti ohranyi zdorovia naseleniia) – Health for all – All for health in Russia (Series of reports on public health policy)*, 6, 119–122 [in Russian].

2. Korzun, V. N., Los, I. P., Zamostian, P. V. (2003). Ekolooho-hihiiienichni problemy kharchuvannia naselennia pivnichnykh rehioniv Ukrainy [Ecological and hygienic problems of nutrition of the population of the northern regions of Ukraine]. *Hihiiena naselenykh mist – Hygiene of populated places*, 42, 442–448 [in Ukrainian].

3. Beliaeva, N. A., Tsyb, A. F., Shakhtaryn, V. V. (2001). Pischevaia dobavka yod-aktiv v profilaktike i lechenii endemicheskogo zoba [Food supplement iodine-active in the prevention and treatment of endemic goiter]. *Metodologiiia razrabotki i realizatsii regionalnykh programm “Zdorovoe pitanie” – Methodology for the development and implementation of regional programs “Healthy Nutrition”* (pp. 110–113). Tver [in Russian].

4. Rumyantseva, V. V., Koriachkina, S. Ya. (2000). Zefir spetsialnogo naznacheniya (yodirovanie zefira s dobavkoy poroshka laminarii) [Special purpose marshmallow (iodization of marshmallow with the addition of kelp powder)]. *Pischevaya tehnologiia – Food technology*, 2, 3, 46–48 [in Russian].

5. Palamarek, K. V. (2013). Proektuvannia bilkovo-roslynnykh past z pidvyshchenym vmistom yodu [Planning of high-iodine protein-vegetable paste]: *Obladnannia ta tekhnologii kharchovykh vyrobnytstv – Equipment and technology of food production*, 30, 135-143 [in Ukrainian].

6. Palamarek, K. V., Peresichnyi, M. I. (2013). Mineralnyi ta vitaminnyi sklad syrno-roslynnykh past z pidvyshchenym vmistom yodu [Mineral and vitamin composition of cheese and vegetable pastes with high iodine content]. *Tovary i rynky – Goods and markets*, 2 (16), 125-131 [in Ukrainian].

7. Palamarek K. V., Romanenko, R. P. (2013). Strukturno-mekhanichni vlastyivosti ovochevykh past z vykorystanniam yodovmisnoi syrovyny [Structural-mechanical properties of vegetable paste using iodine-containing raw materials]. *Sbornik nauchnykh trudov SWorld – Collection of scientific papers SWorld*, 14 (4), 44-49 [in Russian].

8. Palamarek, K. V., Korzun, V. N. (2014). Masova kontsentratsiia yodu v ovochevo-yaiechnykh pastakh [Mass concentration of iodine in vegetable-egg pastes]. *Kharchova nauka i tekhnologiia – Food Science and Technology*, 2 (27), 10-14 [in Ukrainian].

9. Palamarek K. V., Peresichnyi, M. I. (2016). Optyimizatsiia retsepturnoho skladu ovochevykh past z yodovmisnoi syrovynoiu [Optimization of prescription composition of vegetable paste with iodine-containing raw material]. *Tekhnolohichni audyt ta rezervy vyrobnytstva – Technological audit and production reserves*, 2/4 (28), 11-17 [in Ukrainian].

10. Skurihin, I. M., Volgareva, M. I. (Eds.) (1994). *Khimicheskii sostav blyud i kulinarykh izdelii. Spravochnye tablitsy sodержaniia osnovnykh pischevykh veschestv i energeticheskoi tsennosti blyud i kulinarykh izdelii [The chemical composition of dishes and culinary products. Reference tables of the contents of the main nutrients and the energy value of dishes and culinary products]* (Vol. 2). Moscow [in Russian].

11. Skurihin, I. M., Volgareva, M. I. (Eds.) (1994). *Khimicheskii sostav blyud i kulinarykh izdelii. Spravochnye tablitsy sodержaniia osnovnykh pischevykh veschestv i energeticheskoi tsennosti blyud i kulinarykh izdelii [The chemical composition of dishes and culinary products. Reference tables of the contents of the main nutrients and the energy value of dishes and culinary products]* (Vol. 1). Moscow [in Russian].

12. Skurihin, I. M., Tutelna V. A. (Eds.) (2002). *Sostav Rossiyskikh pischevykh produktov [The composition of Russian food]*. Moscow: DeLi [in Russian].

13. Erl, M. (2000). *Spravochnik po vitaminam i mineralnyim veschestvam [Handbook of Vitamins and Minerals]*. Moscow: Meditsina i pitanie [in Russian].

14. Palamarek K. V. (2017). Investigation of hydration and formation of structural-mechanical properties of vegetable paste with iodine-containing raw material. *Technology audit and production reserves*, 6/3 (38), 63-70 [in English].

15. Golubev, V. N., Shelukhina, N. P. (1995). *Pektin: khimiia, tehnologiia, primenenie [Pectin: chemistry, technology, application]*. Moscow: IECh ATN RF [in Russian].

16. Granatova, V. P., Kasyanov, G. I., Kvasenkov, O. I. (2000). *Patent 2195133 Rossiia, A.s. 2148365, A 23 L 1/0524 Pischevoy strukturoobrazovatel [Food builder]*.

17. Olenovych, O. A. (2014). Defitsyt yodu – naslidky dlia zdorovia liudyny ta shliakhy poperedzhennia [Deficiency of iodine – Implications for human health and ways of prevention]. *Molodyi Bukovynets – Young Bukovinets*, 23 [in Ukrainian].

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

18. Kaminskyi, O. V., Afanasiev, D. Ye., Kovalenko, O. M. (2012). *Standarty nadannia medychnoi dopomohy khvorym z patolohichnymy stanamy shchytopodobnoi zalozy v umovakh dii nehatyvnykh chynnykiv dovykillia* [Standards of medical care provision for patients with pathological conditions of the thyroid gland under conditions of negative environmental factors]. Kyiv: TOV «Den Pechaty» [in Ukrainian].

19. WHO/NUT Indicators for assessing Iodine Deficiency Disorders and their control through salt iodization. World Health Organization, United Nations Children's Fund, International Council for Control of Iodine Deficiency Disorders. WHO/NUT/94.6 (1994). Geneva: WHO [in English].

20. Sandell, E. B., Kolthoff, I. M. (1984). Chronometric catalytic Method for the Determination of micro Quantities of Jodine. *J. Am. Chem. Soc.*, 56, 1426 [in English].

21. Yatsimirskiy, K. B. (1967). *Kineticheskie metody analiza* [Kinetic methods of analysis]. Moscow: Khimiia [in Russian].

UDC 664.849:613.292

Karina Palamarek

THE USE OF DEVELOPED VEGETABLE PASTES WITH IODINE-CONTAINING RAW MATERIALS IN THE TECHNOLOGY OF ROLLS WITH VEGETABLE STUFFING

Urgency of the research. Creation of products with high content of bioavailable iodine is investigated, which is an actual task of the present stage of development of the food industry in solving which an important role is played by researches aimed at the further introduction of progressive methods of production of vegetable pastes with iodine-containing raw materials.

Target setting. For prevention of diseases caused by iodine deficiency, it is promising to increase its content in food products due to the complex use of dietary supplements, food raw materials and functional ingredients in which iodine is in an organically bound state and in combination with its synergists.

Actual scientific researches and issues analysis. Both classical works and contemporary publications in domestic and foreign sources relevant to this problem were considered.

Uninvestigated parts of general matters defining. Creation of culinary products in which iodine is in an organically bound state and in combination with its synergists.

The research objective. Development of technology and carrying out of medical and biological testing of developed culinary products in which iodine is in an organically bound state and in combination with its synergists, which ensures high consumer properties of finished products, and in which the iodine content after heat treatment will provide the daily need in it.

The statement of basic materials. Experimental studies have established an increase in iodine content after heat treatment in vegetable paste. The technology of new rolls with vegetable paste has been developed and their quality has been investigated. The medical and biological testing of developed rolls using vegetable paste with iodine-containing raw material was carried out.

Conclusions. It is determined that iodine content in vegetable paste after heat treatment decreases in them by 49.3%. Consequently, iodine losses during heat treatment are significant, but the end result is sufficient to maintain a daily iodine requirement of 65%. It has been established that a two-week supplemental use of the rolls is sufficient to improve the iodine maintenance of the body of the examined patients, which is evidenced by an increase in serum iodine content by 12.6% and an increase of 15.1% in the iodine index.

Keywords: vegetable paste with iodine-containing raw material; nutrients-synergist; prevention of iodine deficiency; concentration; kappa-carrageenan; rolls with vegetable fillings; iodine deficiency states.

Fig.: 3. Table: 1. References: 21.

Паламарек Каріна Вікторівна – кандидат технічних наук, доцент, Чернівецький торговельно-економічний інститут КНТЕУ (Центральна площа, 7, м. Чернівці, 58000, Україна).

Palamarek Karina – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernivtsi Trade and Economic Institute KNTU (Central square, 7, 58000 Chernivtsi, Ukraine).

E-mail: karinkap55@gmail.com

ORCID: orcid.org/0000-0003-4138-404X

РОЗДІЛ V. БУДІВНИЦТВО ТА ГЕОДЕЗІЯ

УДК 628.11

DOI: 10.25140/2411-5363-2019-1(15)-246-257

Володимир Іванишин, Єгор Чорний

ФАКТОРИ ФОРМУВАННЯ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ПІДЗЕМНИХ ВОД ЧЕРНІГІВСЬКОГО РОДОВИЩА ТА ОРГАНІЗАЦІЯ ЗОН ЇХ САНІТАРНОЇ ОХОРОНИ

Актуальність теми дослідження. У процесі дослідження підземних вод будь-якої країни актуальним є визначення факторів формування хімічного складу та організація зон санітарної охорони (ЗСО) їх, тому що ці фактори впливають на якість води, а вона – на здоров'я людини.

Постановка проблеми. Для забезпечення якісних характеристик підземних питних вод потрібно всебічно, детально вивчати їх. Проблема ця складна, оскільки містить у собі багато факторів, кожен із яких потребує детального вивчення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Публікації про фактори формування хімічного складу підземних вод Чернігівського родовища та санітарну охорону їх відсутні.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Недостатньо дослідженою частиною загальної проблеми є зв'язок формування підземних вод з історією геологічного розвитку (палеотектонікою) окремих блоків Дніпровсько-Донецької западини.

Постановка завдання. Цільовим завданням було вивчення факторів формування хімічного складу підземних питних вод Чернігівського родовища, організація зон санітарної охорони їх та інформування зацікавлених осіб про отримані результати.

Виклад основного матеріалу. На Чернігівському родовищі підземних питних вод експлуатується бучацький водоносний горизонт і сеноман-нижньокрейдовий водоносний комплекс, які знаходяться в зоні вільного водообміну, що значною мірою зумовлює умови формування сольового складу цих вод. Їхній хімічний склад формується також через вилуговування й розчинення водовміщуючих порід. Менший вплив на хімічний склад вод має сорбція, іонний обмін та біохімічні процеси. Область живлення бучацького водоносного горизонту й сеноман-нижньокрейдового водоносного комплексу знаходиться на північному сході від водозабору Чернігівського відділення ПАТ «САН ІнБев Україна».

Відповідно до положення про порядок проектування та експлуатації зон санітарної охорони джерел водопостачання та водопроводів господарсько-питного призначення передбачається три пояси зон санітарної охорони: I пояс – зона суворого режиму; II та III пояси – зони обмежень. Межі першого поясу зон санітарної охорони мають радіус 15 м. Другий пояс встановлено для захисту водоносного горизонту від мікробних забруднень, третій – для захисту підземних вод від хімічного забруднення. Межі другого і третього поясів визначені гідродинамічним способом.

Висновки відповідно до статті. Бучацький водоносний горизонт і сеноман-нижньокрейдовий водоносний комплекс знаходяться в зоні вільного водообміну, що значною мірою створює умови формування сольового складу підземних вод. Санітарні заходи з ліквідації забруднень у межах зон санітарної охорони в першому поясі повинно виконувати Чернігівське відділення ПАТ «САН ІнБев Україна», у другому та третьому – власники об'єктів, що негативно впливають або можуть впливати на якість води в джерелах, з яких беруть питну воду.

Ключові слова: водоносний горизонт; комплекс; фактори; хімічний склад; санітарний стан підземних вод; природна захищеність підземних вод; зони санітарної охорони.

Рис.: 4. Табл.: 7. Бібл.: 8.

Актуальність теми дослідження. У процесі дослідження підземних вод будь-якої країни актуальним є визначення факторів формування хімічного складу та організація зон санітарної охорони (ЗСО) їх, тому що ці фактори впливають на якість води, а вона – на здоров'я людини.

Постановка проблеми. Для забезпечення якісних характеристик підземних питних вод потрібно всебічно, детально вивчати їх. Проблема ця складна, адже містить у собі багато факторів, кожен із яких потребує докладного вивчення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Публікації про фактори формування хімічного складу підземних вод Чернігівського родовища та санітарну охорону їх відсутні.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Недостатньо дослідженою частиною загальної проблеми є зв'язок формування підземних вод з історією геологічного розвитку (палеотектонікою) окремих блоків Дніпровсько-Донецької западини.

Мета статті. Метою статті є поширення інформації про фактори формування хімічного складу підземних вод Чернігівського родовища та облаштування зон санітарної охорони їх.

Виклад основного матеріалу.

Фактори формування хімічного складу підземних вод.

Живлення й розвантаження підземних вод у водоносних горизонтах відбувається на великих площах, які значно перевищують розміри водозабору Чернігівського відділення ПАТ «САН ІнБев Україна».

У гідрогеологічному плані бучацький водоносний горизонт і сеноман-нижньокрейдовий водоносний комплекс розташований у зоні вільного водообміну, що значною мірою створює умови формування сольового складу підземних вод.

За сучасним уявленням у Дніпровському артезіанському басейні переважає вертикальний водообмін. Він сформувався в процесі тривалого континентального розвитку басейну. Відповідно до загальноприйнятих гідродинамічних схем, порові розчини водотривких шарів розглядаються як динамічно рухома частина єдиної водообмінної системи басейну, що активно бере участь у водообміні. Генетично-порові розчини водотривких шарів відносяться до інфільтрогенних. Їхній хімічний склад формується під впливом хімічного складу підземних вод, які фільтруються через водотривкі шари іонно-сольового комплексу глинистих порід, що взаємодіють із цими поровими розчинами.

Хімічний склад підземних вод формується також у процесі вилужування й розчинення водовміщуючих порід. Менший вплив на хімічний склад має сорбція, іонний обмін та біохімічні процеси.

За результатами хімічних аналізів підземних вод на діючих водозаборах м. Чернігова з розвіданими ділянками на бучацький водоносний горизонт і сеноман-нижньокрейдовий водоносний комплекс, хімічний склад підземних вод із часу переоцінки запасів (1972 р.) залишається постійним. Немає підстав очікувати погіршення гідрохімічних умов у майбутньому, тому що експлуатаційні запаси підземних вод бучацького водоносного горизонту і сеноман-нижньокрейдового водоносного комплексу формуються переважно за рахунок інфільтрації атмосферних опадів і поверхневих вод, хімічний склад яких практично мало змінюється.

У межах зони впливу водозабору відсутні потенційні джерела забруднення.

Водоносний горизонт еоценових відкладів покритий товщею алевроїтів київської серії завтовшки понад 20,0 м, а водоносний комплекс сеноман-нижньокрейдових відкладів покритий мергельно-крейдовою товщею крейди завтовшки понад 350,0 м.

Область живлення бучацького водоносного горизонту й сеноман-нижньокрейдового водоносного комплексу розташована на північному сході від водозабору.

Організація зон санітарної охорони (ЗСО).

Правовий режим зон санітарної охорони визначений відповідно до статті 93 Водного кодексу України [1] та Постанови Кабінету Міністрів України № 2024 від 18 грудня 1998 року «Про правовий режим зон санітарної охорони водних об'єктів» [2].

Санітарний стан підземних вод.

Санітарний стан підземних вод водозабору Чернігівського відділення ПАТ «САН ІнБев Україна» контролюється Чернігівським міським відділом лабораторних досліджень ДУ «Чернігівський обласний лабораторний центр ДСЕС України». Фізико-хімічний та бактеріологічний склад відповідає вимогам ДСанПін 2.2.4-171-10 «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною» [3].

Вміст радіонуклідів відповідає вимогам ГН 6.6.1.1-130 2006 «Допустимі рівні вмісту радіонуклідів ^{137}Cs та ^{90}Sr в продуктах харчування та питної води», затверджених наказом МОЗ України за № 256 та НРБУ-97 за вмістом U, Ra, Rn.

Санітарна характеристика території родовища.

Межі ділянки Чернігівського родовища питних підземних вод (свердловини 1, 2, 3) Чернігівського відділення ПАТ «САН ІнБев Україна» відповідають розмірам другого поясу ЗСО.

Під час проведення обстеження території Чернігівського відділення ПАТ «САН ІнБев Україна» і місць розташування свердловин 1, 2, 3 особлива увага приділялася виявленню джерел можливого забруднення підземних вод із поверхні землі, передусім через покинуті свердловини та свердловини, що розташовані в межах ЗСО водозабору й експлуатуються з порушенням нормативів та законодавчих документів.

За результатами обстеження території родовища і місць розташування свердловин встановлено, що поверхня землі на території родовища й заводу рівнинна, забудована. Територія в межах першого поясу ЗСО свердловин 1, 2, 3 (пояс суворого режиму) огорожена та утримується в належному стані. Джерела можливого забруднення підземних вод на території родовища й у межах зон санітарної охорони свердловин підприємства відсутні.

Загалом, санітарні умови території родовища питних підземних вод і водозабору Чернігівського відділення ПАТ «САН ІнБев Україна» є задовільними.

Природна захищеність підземних вод.

Під природною захищеністю підземних вод розуміється сукупність геологічних, гідрогеологічних і гідродинамічних умов, що перешкоджають проникненню забруднюючих речовин із поверхні землі у водоносні горизонти. До них відноситься глибина залягання підземних вод, літологічний склад порід зони аерації, товщина та водопроникність водотривких порід, величина напору та співвідношення рівнів ґрунтових і напірних вод [4].

Згідно з картою природної захищеності в Чернігівській області підземні води бучацького водоносного горизонту, який є першим міжпластовим водоносним горизонтом на території, що розглядається, оцінені, як захищені.

Природну захищеність підземних вод бучацького водоносного горизонту від впливу зовнішніх джерел забруднення забезпечують водотривкі товщі, які мають локальне й регіональне розповсюдження, а також гідродинамічні умови водоносних горизонтів. Геологічний розріз району робіт від поверхні землі до глибини 86,0 м складений четвертинними суглинками, неогеновими і харківськими глинами локального розповсюдження. Глибина залягання водоносного горизонту становить 80-100 м. Водоносний горизонт має напірні властивості. Висота напору – 40-95 м, п'єзометричні рівні встановлені на глибині 10-40 м. Нижче залягає водотривка товща київських мергелів завтовшки понад 24,0 м, яка має регіональне поширення.

На підставі викладеного, бучацький водоносний горизонт за літологічними показниками визначено як захищений від забруднення з поверхні землі.

Товщина осадових порід, що залягають над сеноман-нижньокрейдовими відкладами, становить понад 320,0 м. Водотривкі породи мають регіональне розповсюдження. Напір водоносного комплексу в свердловинах 2, 3 перевищує 550,0 м, що свідчить про гідродинамічну захищеність водоносного комплексу.

Зважаючи на ці дані, можна зробити висновок, що забруднення бучацького водоносного горизонту і сеноман-нижньокрейдового водоносного комплексу, на які обладнані свердловини на водозаборі Чернігівського відділення ПАТ «САН ІнБев Україна», природнім шляхом (надходження забруднення з поверхні землі через товщу порід) є неможливе.

Розрахунок зон санітарної охорони.

Згідно з положенням № 2640-82 [5] і ДБН В.2.5-74:2013 [6] про порядок проектування та експлуатацію зон санітарної охорони джерел водопостачання та водопроводів господарсько-питного призначення передбачається три пояси зон санітарної охорони:

I пояс – зона суворого режиму;

II та III пояси – зони обмежень.

Зона санітарної охорони першого поясу.

Зона санітарної охорони першого поясу згідно з ДБН В.2.5-74:2013 «Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди» при використанні захищених водоносних горизонтів

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

встановлюється в радіусі 30 м від свердловини, а за погодженням із місцевою санепідемстанцією може бути зменшена до 15 м.

Межі першого поясу зон санітарної охорони на водозаборі Чернігівського відділення ПАТ «САН ІнБев Україна» мають радіус 15 м (табл. 1, рис. 1, 2).

Таблиця 1

Розміри першого поясу меж зон санітарної охорони свердловин водозабору Чернігівського відділення ПАТ «САН ІнБев Україна»

Номери свердловин	Розміри меж зон суворого режиму, м
1	31,0×65,5×31,0×65,0
2	(свердловини на одній ділянці)
3	24,5×34,0×34,0×3,2×34,0

Зона санітарної охорони другого і третього поясу – зона обмежень.

Другий пояс ЗСО встановлюється для захисту водоносного горизонту від мікробних забруднень, але через те, що другий пояс розташований усередині третього, він застосовується також для захисту від хімічного забруднення.

Основним параметром, який визначає відстань від меж другого поясу ЗСО до водозабору, є розрахунковий час T_m просування мікробного забруднення з потоком підземних вод до водозабору.

Цей час повинен бути достатнім для втрати живучості й вірулентності патогенних мікроорганізмів, тобто для ефективного самоочищення.

Межа другого поясу ЗСО визначається гідродинамічним способом, зважаючи на те, що мікробне забруднення, яке через зону аерації чи іншим способом попадає у водонесний горизонт, не досягне водозабору через час T_m .

Третій пояс ЗСО встановлюється для захисту підземних вод від хімічного забруднення.

Розташування меж третього поясу ЗСО також визначається гідродинамічним способом, з огляду на те, що якщо за межами цієї зони у водонесний горизонт попадуть хімічні забруднення, вони не досягнуть водозабору, або ж досягнуть, але не раніше розрахункового часу T_x .

Методи розрахунку для визначення меж другого і третього поясів ЗСО однакові та наведені в «Рекомендації щодо гідрогеологічних розрахунків для визначення меж 2 і 3 поясів зон санітарної охорони підземних джерел господарсько-питного водопостачання» [7]. У нашому конкретному випадку водозабір розташований у межах бучацького водоносного горизонту і водоносного комплексу сеноман-нижньокрейдових відкладів, які мають напірні властивості та повсюдне поширення.

Природний потік бучацького водоносного горизонту і сеноман-нижньокрейдового водоносного комплексу в непорушених умовах за даними [8], звіту «Геолого-економічна оцінка експлуатаційних запасів Чернігівського родовища питних підземних вод (свердловини 1, 2, 3) для господарсько-питного водопостачання Чернігівського відділення ПАТ «САН ІнБев Україна» у м. Чернігові» (Чернігів, 2011 р.), має такі ухили:

- бучацький водоносний горизонт – $i=0,0001$;
- водоносний комплекс сеноман-нижньокрейдових відкладів – $i=0,00002$.

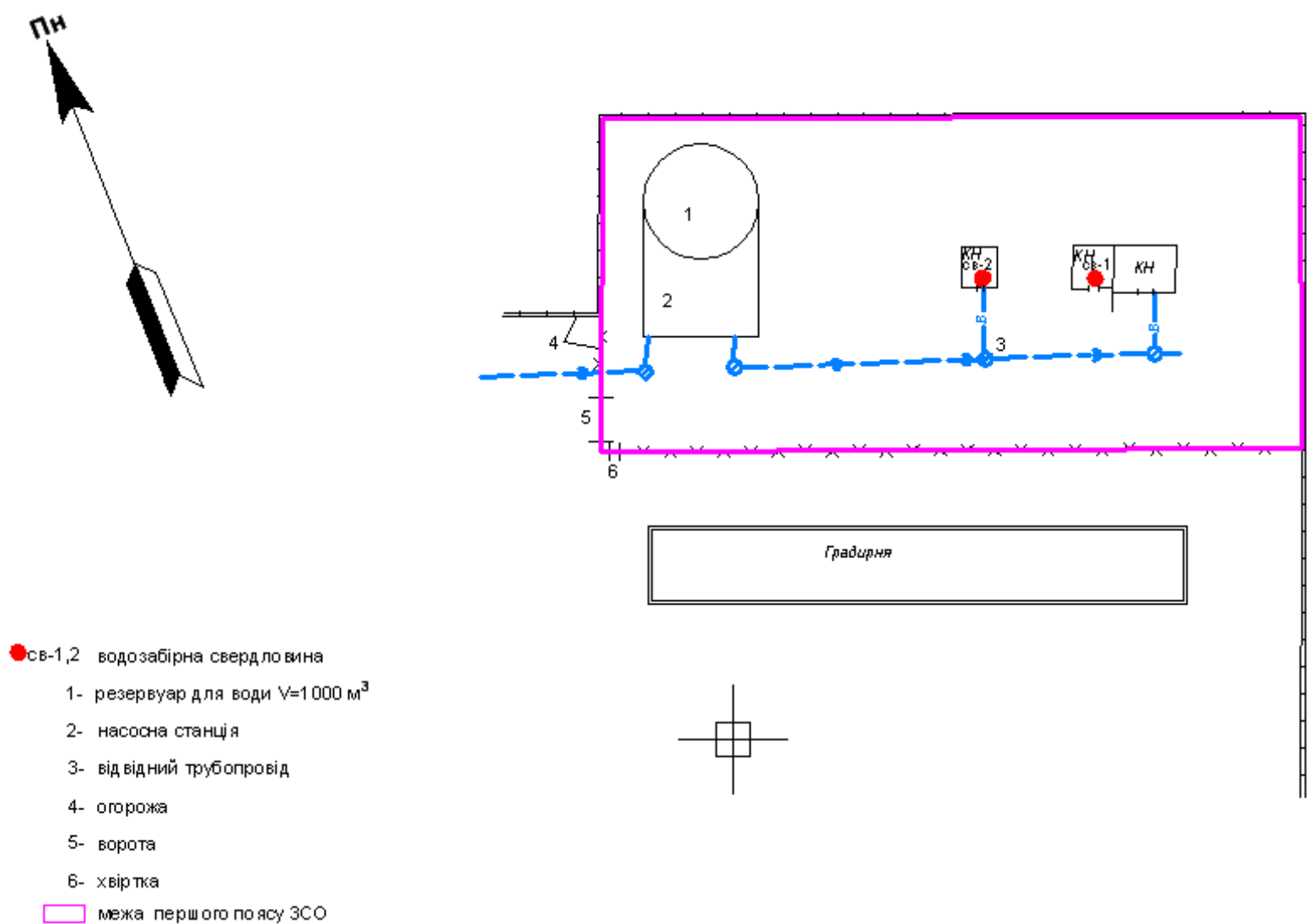


Рис. 1. План першого поясу зони санітарної охорони свердловин 1, 2
Чернігівського відділення ПАТ «САН ІнБев Україна» М 1:500

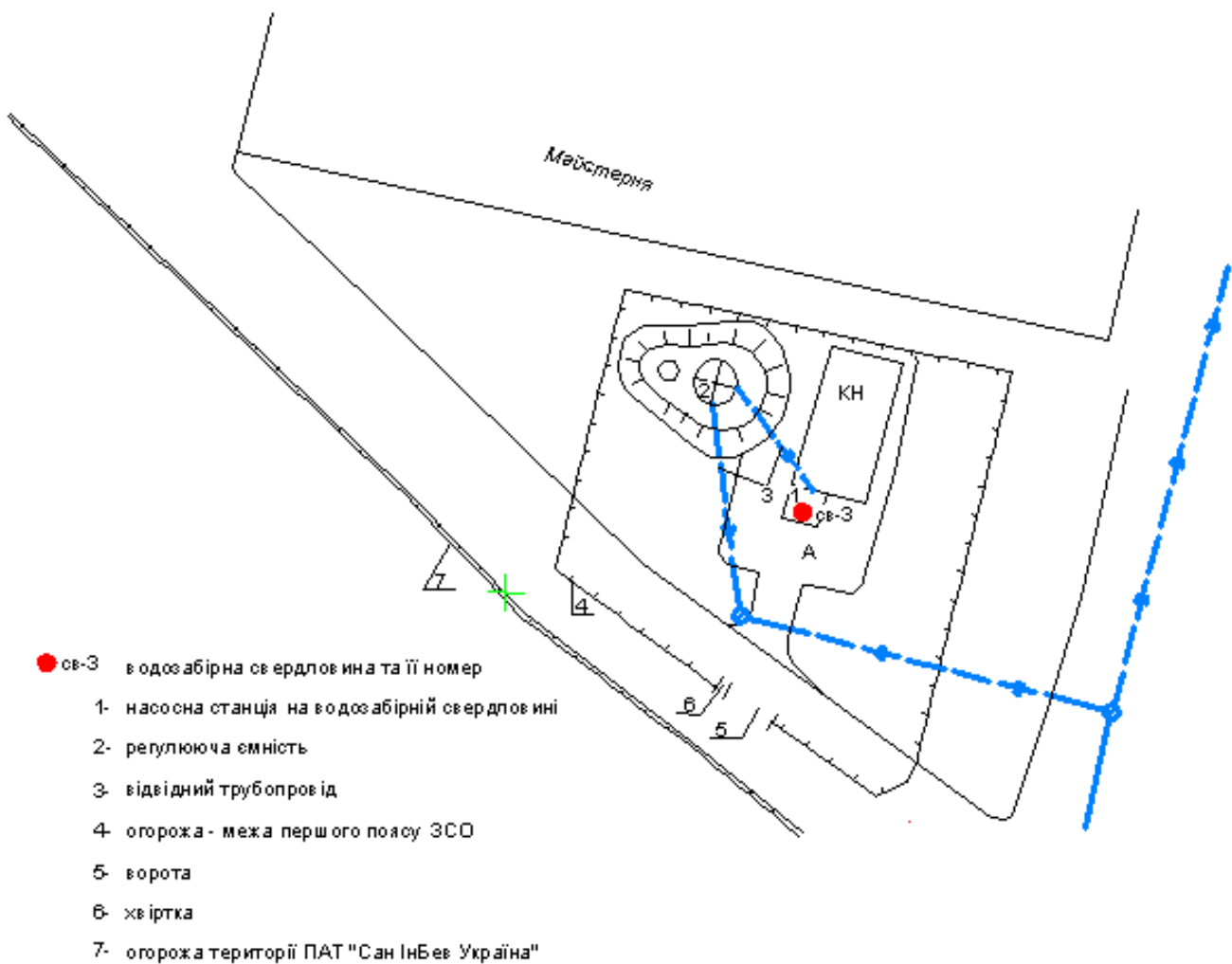


Рис. 2. План першого поясу зони санітарної охорони свердловини 3
Чернігівського відділення ПАТ «САН ІнБев Україна» М 1:500

Розрахунки меж другого і третього поясів зон санітарної охорони виконані відповідно до «Рекомендацій...» [7] за формулами:

$$X_e = \frac{Q}{2\pi q}; \quad (1)$$

$$q = km_i; \quad (2)$$

$$\bar{T} = \frac{qT}{mnX_b}; \quad (3)$$

$$r_{II,III} = \sqrt{\frac{QT}{\pi mn}}, \quad (4)$$

де X_e – відстань від водозабору до водороздільної точки розташованої нижче за потоком, м;

Q – проектний дебіт, м³/добу;

T – розрахунковий термін експлуатації водозабору, доба;

m – потужність водоносної верстви, м;

km – водопровідність, м²/добу;

n – пористість, %;

i – п'єзометричний нахил потоку;

q – природний потік, м²/добу;

\bar{T} – безрозмірний параметр, для визначення розмірів ЗСО;

$r_{II,III}$ – радіус зони обмежень, м.

Другий пояс зони санітарної охорони передбачений для захисту водоносного горизонту від мікробного забруднення.

Час виживання бактерій у межах другого кліматичного району – 200 діб [5].

Третій пояс зони санітарної охорони передбачений для захисту водоносного горизонту від хімічного забруднення.

Розрахунковий термін експлуатації водозабору 10⁴ діб [7].

Вихідні дані й результати розрахунків наведені в табл. 1–6.

Зони санітарної охорони показані на рис. 3, 4.

Санітарні заходи з ліквідації забруднень у межах ЗСО згідно з ДБН В.2.5-74:2013 [6] повинні виконувати:

- у першому поясі – Чернігівське відділення ПАТ «САН ІнБев Україна»;
- у другому та третьому поясах – власники об'єктів, що негативно впливають або можуть впливати на якість води в джерелах питного водопостачання.

Буцацький водоносний горизонт

Розрахунки виконані за формулами (1)-(4). Вихідні дані й результати розрахунків наведено в табл. 2, 3.

Таблиця 2

Розрахунок третього поясу ЗСО свердловини I

Q м ³ /доб	m, м	n, %	km, м ² /доб	i	q, м ² /доб	T, діб	X _b , м	\bar{T}	r _{III} , м
720	20	0,15	150	0,0001	0,015	10 ⁴	7643	0,0065	874

Таблиця 3

Розрахунок другого поясу ЗСО свердловини I

Q м ³ /доб	m, м	n, %	km, м ² /доб	i	q, м ² /доб	T, діб	X _b , м	\bar{T}	r _{II} , м
720	20	0,15	150	0,0001	0,015	200	7643	0,00013	124

Примітка. Якщо $\bar{T} \leq 0,04$, то $r_{II,III}$ вираховується за формулою (4).

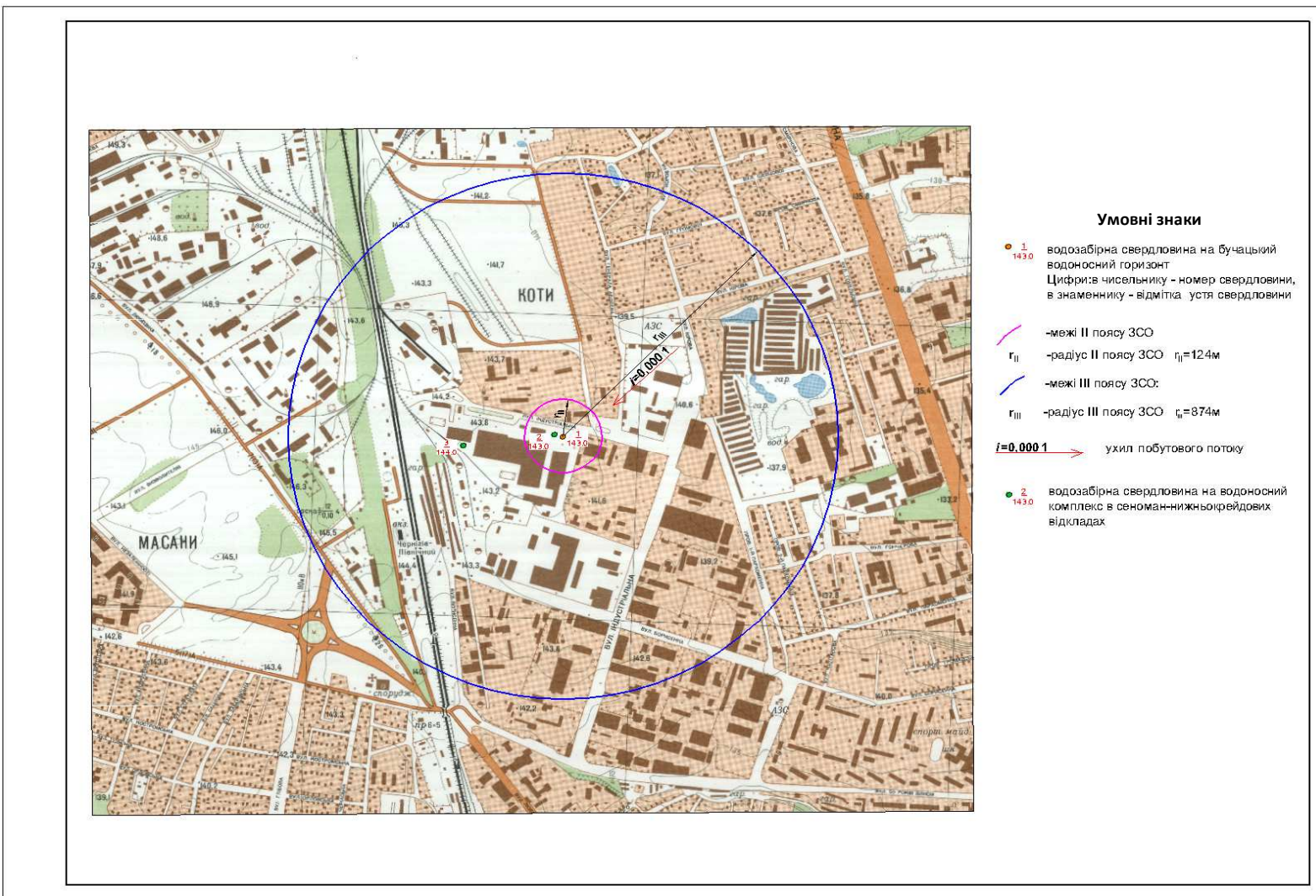


Рис. 3. План другого і третього поясів зон санітарної охорони свердловини 1 Чернігівського відділення ПАТ «САН ІнБев Україна» М 1:10000

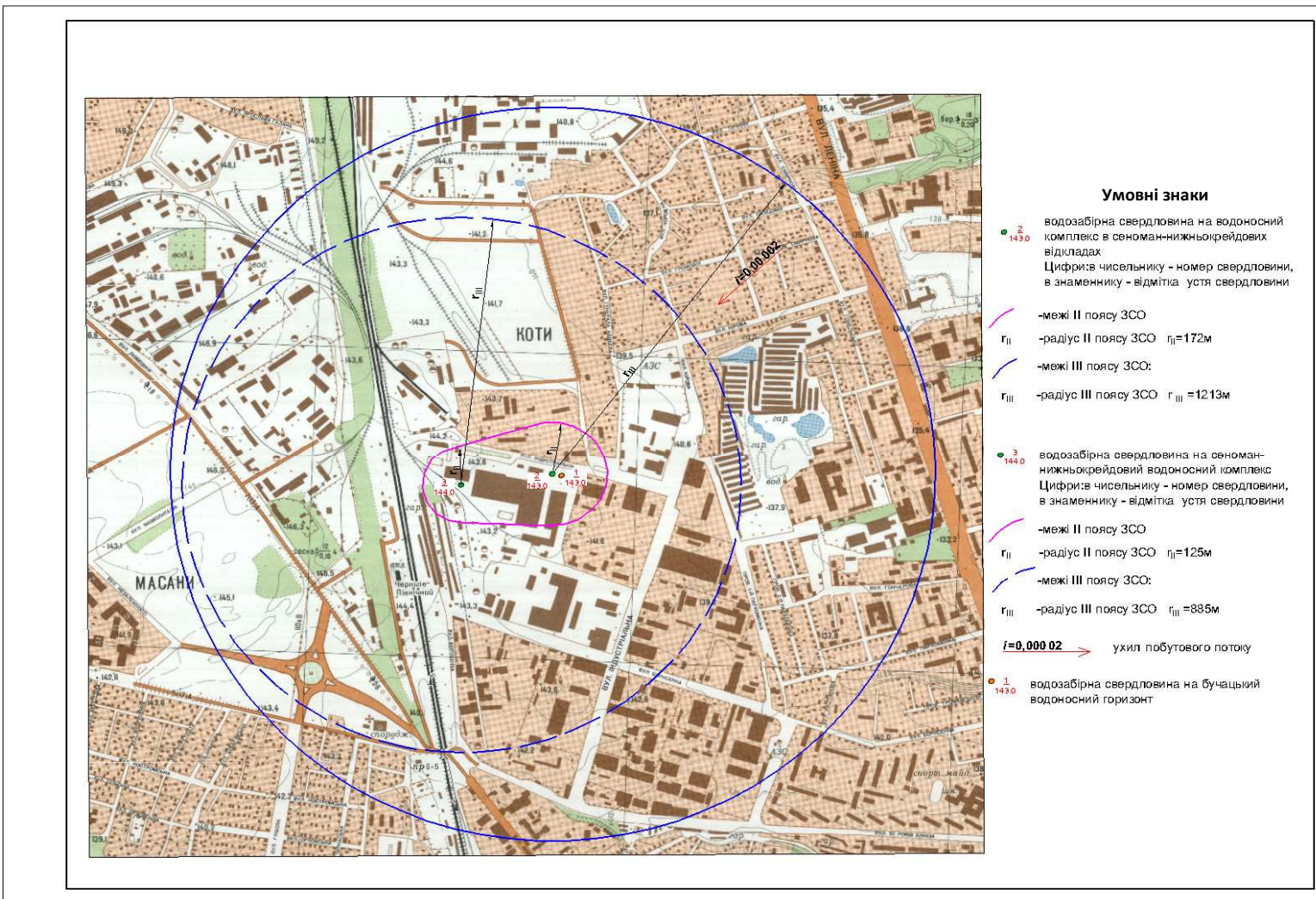


Рис. 4. План другого і третього поясів зон санітарної охорони свердловин 2, 3 Чернігівського відділення ПАТ «САН ІнБев Україна» М 1:10000

Сеноман-нижньокрейдвий водоносний комплекс

Розрахунки виконані за формулами (1)-(4). Вихідні дані й результати розрахунків наведено в табл. 4-5.

Таблиця 4

Розрахунок третього поясу ЗСО свердловини 2

Q м ³ /доб	m, м	n, %	km, м ² /доб	i	q, м ² /доб	T, діб	X _в , м	\bar{T}	r _{III} , м
3120	45	0,15	1000	0,00002	0,02	10 ⁴	24840	0,001	1213

Таблиця 5

Розрахунок другого поясу ЗСО свердловини 2

Q м ³ /доб	m, м	n, %	km, м ² /доб	i	q, м ² /доб	T, діб	X _в , м	\bar{T}	r _{II} , м
3120	45	0,15	1000	0,00002	0,02	200	24840	0,00002	172

Примітка. Якщо $\bar{T} \leq 0,04$, то r_{II,III} вираховується за формулою (4).

Таблиця 6

Розрахунок третього поясу ЗСО свердловини 3

Q м ³ /доб	m, м	n, %	km, м ² /доб	i	q, м ² /доб	T, діб	X _в , м	\bar{T}	r _{III} , м
2400	65	0,15	1000	0,00002	0,02	10 ⁴	19108	0,0003	885

Таблиця 7

Розрахунок другого поясу ЗСО свердловини 3

Q м ³ /доб	m, м	n, %	km, м ² /доб	i	q, м ² /доб	T, діб	X _в , м	\bar{T}	r _{II} , м
2400	65	0,15	1000	0,00002	0,02	10 ⁴	19108	0,00002	125

Примітка. Якщо $\bar{T} \leq 0,04$, то r_{II,III} вираховується за формулою (4).

Висновки відповідно до статті. Буцацький водоносний горизонт і сеноман-нижньокрейдвий водоносний комплекс розташований у зоні вільного водообміну, що значною мірою створює умови формування сольового складу підземних вод. Санітарні заходи з ліквідації забруднень у межах зон санітарної охорони в першому поясі повинно виконувати Чернігівське відділення ПАТ «САН ІнБев Україна», у другому та третьому – власники об'єктів, що негативно впливають або можуть впливати на якість води в джерелах, з яких беруть питну воду.

Список використаних джерел

1. Водний кодекс України: Відомості Верховної Ради України. *Відомості Верховної Ради України*. 1995. № 24. Ст. 189. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80>.
2. Про правовий режим зон санітарної охорони водних об'єктів: Постанова Кабінету Міністрів України від 18 грудня 1998 р. № 2024. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2024-98-%D0%BF>.
3. ДСанПіН 2.2.4-171-10 «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною».
4. Карта естественной защищенности подземных вод Украинской ССР масштаба 1:200 000 (Черниговская область). 1987.
5. Положение о порядке проектирования и эксплуатации ЗСО источников водоснабжения и водопроводов хозяйственно-питьевого назначения № 2640-82.
6. ДБН В.2.5-74:2013 «Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди». Основні положення проектування.
7. Рекомендации по гидрогеологическим расчетам для определения границ 2 и 3 поясов зон санитарной охраны подземных вод источников хозяйственно-питьевого водоснабжения. Москва, ВНИИ. Водгео, 1983.

8. Геологическая карта СССР. Масштаб 1:200 000. Серия Днепроовско-Донецкая Лист М-36-II (Чернигов). 1973.

References

1. Vodnyi kodeks Ukrainy [Water Code of Ukraine] (1995). *Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy – Bulletin of Verkhovna Rada of Ukraine*, 24, 189 [in Ukrainian].
2. Pro pravovyi rezhym zon sanitarnoi okhorony vodnykh ob'ektiv [On the legal regime of zones of sanitary protection of water objects] (1998). № 2024 (from December 18, 1998) [in Ukrainian].
3. Hihienichni vymohy do vody pytnoi, pryznachenoї dlia spozhyvannia liudynoiu [Hygienic requirements for drinking water intended for human consumption] (2010). DSanPiN 2.2.4-171-10-2010. (12, 2010 № 400) [in Ukrainian].
4. Karta estestvennoi zashchyschenosti podzemnykh vod Ukraynskoї SSR masshtaba 1:200 000 (Chernyovskaia oblast) [Map of natural protection of groundwater of the Ukrainian SSR in scale 1: 200 000 (Chernihiv region)] (1987) [in Russian].
5. Polozhenie o poriadke proektirovannia i ekspluatatsii ZSO istochnikov vodosnabzheniia i vodoprovodov khoziaistvenno-pitevogo naznacheniiia [Regulation on the design and operation of the SOZ of water supply sources and drinking water supply lines] № 2640-82 (1982) [in Ukrainian].
6. «Vodopostachannia. Zovnishni merezhi ta sporudy». Osnovni polozhennia proektuvannia [«Water supply. Extranets and structures». Basic design points] (2013). DBN V.2.5-74: 2013 from 01-01-2014. Kyiv: MINBUD Ukrainy [in Ukrainian].
7. Rekomendatsii po gidrogeologicheskim raschetam dlia opredeleniia granits 2 i 3 poiasov zon sanitarnoy okhrany podzemnykh vod istochnikov khoziaistvenno-pit'yevogo vodosnabzheniia [Recommendations on hydrogeological calculations for determining the boundaries of zones 2 and 3 of zones of sanitary protection of groundwater sources of household and drinking water supply] (1983) Moscow: Vodgeo [in Russian].
8. Geologicheskaia karta SSSR. Masshtab 1:200 000. Seriiia Dneprovsko-Donetskaya List M-36-II (Chernigov) [Geological map of the USSR. Scale 1: 200 000. Series Dnieper-Donetsk Letter M-36-II (Chernigov)] (1973). Kyiv [in Russian].

UDC 628.11

Volodymyr Ivanyshyn, Ehor Chorny

FACTORS OF THE FORMATION OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF UNDERGROUND WATERS OF THE CHERNIGOV DEPOSIT AND ORGANIZATION OF ZONES OF SANITARY PROTECTION OF THEIR

Urgency of the research. *In the study of groundwater of any country, there is a current determination of the factors for the formation of the chemical composition and the organization of sanitary protection zones (SOA) of them, because these factors affect the quality of water, and it affects human health.*

Target setting. *To ensure the qualitative characteristics of groundwater, it is necessary to thoroughly and thoroughly study them. The problem is complex because it contains many factors, each of which requires detailed study.*

Actual scientific researches and issues analysis. *Publications about the factors of formation of the chemical composition of groundwater of the Chernigov field and sanitary protection are absent.*

Uninvestigated parts of general matters defining. *The part of the general problem that has not been sufficiently studied is the connection between the formation of groundwater and the history of geological development (paleotectonics) of individual blocks of the Dnieper-Donets Basin.*

The research objective. *The target task was to study the factors of formation of the chemical composition of groundwater of the Chernigov field, the organization of their sanitary protection zones and informing interested parties about the results.*

The statement of basic materials. *At the Chernigov underground drinking water deposits, the Buchak aquifer and the Cenomanian-Lower Cretaceous aquifer complex are in operation, which are in the zone of free water exchange, which largely determines the conditions for the formation of the salt composition of these waters. Their chemical composition is also formed by leaching and dissolving water-containing rocks. Sorption, ion exchange and biochemical processes have a lesser effect on the chemical composition of water. The feeding area of the Buchaksky aquifer and the Cenomanian-Lower Cretaceous aquifer complex is located in the northeast from the water intake of the Chernihiv branch of the SAN InBev Ukraine.*

In accordance with the regulation on the design and operation of sanitary protection zones of water supply sources and drinking water supply lines, three belts of sanitary protection zones are provided for: I belt - a strict regime zone; II-nd and III-rd zones - zones of restrictions. The boundaries of the first zone of the SOA have a radius of 15 m. The second belt is set to protect the aquifer from microbial pollution, the third - to protect groundwater from chemical pollution. The boundaries of the second and third zones are determined by the hydrodynamic method.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Conclusions. *The Buchak aquifer and the Cenomanian-Lower Cretaceous aquifer complex are in the zone of free water exchange, which largely creates the conditions for the formation of the salt composition of groundwater. Sanitary measures to eliminate pollution within the sanitary protection zones in the first zone should be carried out by Chernihiv branch of SAN InBev Ukraine, in the second and third - owners of facilities that negatively affect or may affect the quality of water in the sources from which they take drinking water.*

Keywords: *aquifer; complex; factors; chemical composition; sanitary state of groundwater; natural protection of groundwater; sanitary protection zone.*

Fig.: 4. Table: 7. References: 8.

Іванишин Володимир Андрійович – доктор геологічних наук, професор, професор кафедри геодезії, картографії та землеустрою, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Ivanyshyn Volodymyr – Doctor of Geological Sciences, Professor, Professor of the Department of Geodesy, Cartography and Land Management, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: gkz.kaf@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2394-1837>

Чорний Єгор Іванович – виконуючий обов'язки директора дочірнього підприємства «Водземпроект».

Chorny Egor – Acting Director of the subsidiary Vodzemproekt.

E-mail: dp.Vodzemproekt@gmail.com

УДК 528.1

DOI: 10.25140/2411-5363-2019-1(15)-258-266

Сергій Крячок

ДОСЛІДЖЕННЯ КРИТЕРІВ ІЗ ВИЯВЛЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ СИСТЕМАТИЧНИХ ПОХИБОК У РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДВІЙНИХ НЕРІВНОТОЧНИХ ГЕОДЕЗИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ

Актуальність теми дослідження. Щоб отримати надійні результати геодезичних вимірювань, необхідно використовувати не тільки сучасні автоматизовані та високоточні геодезичні прилади, а й застосовувати методи математичного опрацювання, які гарантують у підсумку достовірність результатів вимірювань. Головними завданнями математичного опрацювання геодезичних вимірів є обчислення їх ймовірного значення, близького до істинного, а також визначення точності вимірних величин.

Постановка проблеми. Інколи в практиці геодезичних робіт величини вимірюються двічі. У такий спосіб утворюється ряд подвійних вимірів, за яким можна визначати їх різниці та виконати оцінку точності. Систематичні похибки, що містяться в подвійних вимірах, можуть частково компенсуватися в різницях, однак залишкові систематичні складові можуть бути суттєвими. Тому для виявлення залишкових систематичних похибок застосовують кілька критеріїв.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Були розглянуті останні публікації у відкритому доступі, які присвячені висвітленню критеріїв для виявлення залишкових систематичних похибок у різницях подвійних геодезичних нерівноточних вимірів.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Недослідженими є причини неузгодження критеріїв з виявлення значної систематичної похибки в результатах подвійних нерівноточних геодезичних вимірювань у тій же самій вибірці.

Мета статті. Головною метою цієї статті є встановлення причин, за якими критерії з виявлення значної систематичної похибки в результатах подвійних нерівноточних геодезичних вимірювань показують у конкретних випадках протилежні результати.

Виклад основного матеріалу. Проведені теоретичні дослідження та утворено новий критерій для виявлення значної систематичної похибки в різницях подвійних нерівноточних вимірів та його модифікація. Як вихідні дані для математичного моделювання була використана відома вибірка з 9 різниць подвійних нерівноточних вимірів. Обчислена систематична похибка як середня вагова та вилучена з різниць. Шляхом додавання сталої величини до кожної з виправлених різниць імітувалась поява залишкових систематичних похибок. Виконувались обчислення лівих та правих частин кожного з шести відомих критеріїв та нового критерію і його модифікації. У такий спосіб виконувалось математичне моделювання на персональному комп'ютері з використанням програмного засобу MS Excel.

Висновки відповідно до статті. За результатами математичного моделювання встановлено, що відомі критерії в тій же самій вибірці відмічають різні значення значної систематичної похибки. Деякі з них не виявляють навіть великої за значенням систематичної похибки у вибірці, оскільки залежать від співвідношення таких параметрів вибірки, як сума ваг та коефіцієнт Стюдента. За результатами теоретичних досліджень було отримано новий критерій для виявлення залишкових систематичних похибок у різницях подвійних нерівноточних геодезичних вимірів та його модифікація. Цей критерій, на відміну від розглянутих, є стабільним до виявлення значної систематичної складової одиниці ваги на рівні 0,2 від загальної СКП одиниці ваги не залежно від параметрів вибірки та закону розподілу різниць подвійних вимірів.

Ключові слова: теорія похибок геодезичних вимірів; середня квадратична похибка; систематична похибка; подвійні нерівноточні виміри; математичне моделювання.

Табл.: 3. Бібл.: 11.

Актуальність теми дослідження. Щоб отримати надійні результати вимірювань, необхідно використовувати не тільки сучасні автоматизовані, високоточні геодезичні прилади та новітні методики [1-3], а й застосовувати методи математичного опрацювання, які гарантують у підсумку достовірність результатів вимірювань. Адаже відомо, що в процесі вимірювань елементів геодезичних мереж виникають похибки, які спотворюють результати вимірювань. Тому головним завданням математичного опрацювання геодезичних вимірів є обчислення їх ймовірного значення, близького до істинного, а також визначення точності вимірних величин.

Постановка проблеми. Інколи в практиці геодезичних робіт величини вимірюються двічі. У такий спосіб утворюється ряд подвійних вимірів, за яким можна визначати їх різниці та виконати оцінку точності. Систематичні похибки, що містяться в подвійних геодезичних вимірах, можуть частково компенсуватися в різницях, однак залишкові систематичні складові можуть бути суттєвими [4]. Тому для виявлення залишкових систематичних похибок застосовують кілька критеріїв.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Треба зазначити, що розглядаються подвійні геодезичні виміри, нерівноточні між собою, а у кожній парі – рівноточні. У

роботах [4-5] наведено нерівність, яка повинна виконуватись за умови незначних залишкових систематичних похибок

$$\left| \sum_{i=1}^n p_{d_i} d_i \right| \leq 0,25 \sum_{i=1}^n |p_{d_i} d_i|, \tag{1}$$

де d_i – різниці подвійних вимірів; p_{d_i} – ваги різниць; n – число різниць d_i .

Цей критерій передбачає, що значення d_i підкоряються нормальному закономі розподілу похибок вимірювань [5].

У роботі [6] наведено критерій незначних систематичних похибок

$$\left| \sum_{i=1}^n p_{d_i} d_i \right| \leq 1,25 \cdot t_{\beta} \sum_{i=1}^n |p_{d_i} d_i| / \sqrt{\sum_{i=1}^n p_{d_i}}, \tag{2}$$

де t_{β} – коефіцієнт Стьюдента, який встановлюється залежно від кількості надлишкових вимірювань та вибраної довірчої ймовірності.

Для $n > 28$ та для довірчої ймовірності $P = 0,95$ критерій (2) має вигляд [6]

$$\left| \sum_{i=1}^n p_{d_i} d_i \right| \leq 2,5 \sum_{i=1}^n |p_{d_i} d_i| / \sqrt{\sum_{i=1}^n p_{d_i}}. \tag{3}$$

Згідно з джерелами [5; 7; 8] відсутність значних залишкових систематичних похибок у різницях подвійних нерівноточних вимірів підтверджується критерієм

$$\left| \sum_{i=1}^n d_i \cdot \sqrt{p_{d_i}} \right| \leq 0,25 \sum_{i=1}^n |d_i \cdot \sqrt{p_{d_i}}|. \tag{4}$$

Цей критерій також передбачає, що значення d_i підкоряються нормальному закономі розподілу похибок вимірювань [5].

У роботі [6] запропоновано до використання критерій наявності незначних систематичних похибок у різницях d_i у вигляді

$$\left| \sum_{i=1}^n d_i \sqrt{p_{d_i}} \right| \leq 1,25 t_{\beta} \frac{\sum_{i=1}^n |d_i \sqrt{p_{d_i}}|}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sqrt{p_{d_i}}}}, \tag{5}$$

де t_{β} – коефіцієнт Стьюдента.

Умовою незначного впливу систематичної похибки θ на середню квадратичну похибку одиниці ваги (СКП) - μ , вважається виконання нерівності [5]

$$|\theta| \leq 0,2\mu, \tag{6}$$

де μ – середня квадратична похибка (СКП) одиниці ваги [9], яка дорівнює

$$\mu = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n p_{d_i} d_i^2}{n}}, \tag{7}$$

а систематична похибка θ визначається як середня вагова

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^n p_{d_i} d_i}{\sum_{i=1}^n p_{d_i}}. \quad (8)$$

Відомо, що різниці, звільнені від систематичної похибки, дорівнюють [4]

$$d'_i = d_i - \theta. \quad (9)$$

Тоді випадкова складова СКП одиниці ваги дорівнює згідно з [4; 5; 7; 8]

$$\mu' = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n p_{d_i} d_i'^2}{n-1}}. \quad (10)$$

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Аналіз наведених публікацій показує наявність кількох критеріїв із визначення залишкової систематичної похибки в різницях подвійних нерівноточних вимірів. Згідно з дослідженнями, наведеними в статті [6], критерії за формулами (1)–(5) можуть давати в конкретному випадку протилежні результати. Робиться висновок, що критерій за формулою (4) є більш надійним («жорстким») [6; 10] та пропонується для практичного використання, а критерії за формулами (1)–(3) та (5) – для аналізу результатів подвійних рівноточних вимірів та їх дослідження.

Недослідженим є причини неузгодження критеріїв у виявленні значної систематичної похибки в результатах подвійних нерівноточних вимірювань у тій же самій вибірці.

Мета статті. Головною метою цієї статті є встановлення причин, за якими критерії у виявленні значної систематичної похибки в результатах подвійних нерівноточних вимірювань показують у конкретних випадках протилежні результати.

Виклад основного матеріалу. У роботі [6] стверджується, що для обчислення СКП одиниці ваги μ' за різницями d'_i подвійних вимірів, звільнених від систематичної похибки θ , у формулі (10) в знаменнику необхідно мати кількість вимірів n , а не $n-1$. Але не наведено обґрунтування вказаного твердження. Це можна довести таким чином. Якщо піднести праву та ліву частини (9) до квадрату

$$(d'_i)^2 = d_i^2 + \theta^2 - 2d_i\theta, \quad (11)$$

та помножити на ваги p_i , то сума членів лівої та правої частини набуде вигляду

$$\sum_{i=1}^n p_{d_i} (d'_i)^2 = \sum_{i=1}^n p_{d_i} d_i^2 + \theta^2 \sum_{i=1}^n p_{d_i} - 2\theta \sum_{i=1}^n p_{d_i} d_i. \quad (12)$$

Якщо поділити ліву та праву частини формули (12) на $\sum_{i=1}^n p_{d_i}$ та врахувати формулу (8), то

$$\frac{\sum_{i=1}^n p_{d_i} (d'_i)^2}{\sum_{i=1}^n p_{d_i}} = \frac{\sum_{i=1}^n p_{d_i} d_i^2}{\sum_{i=1}^n p_{d_i}} + \theta^2 - 2\theta^2 = \frac{\sum_{i=1}^n p_{d_i} d_i^2}{\sum_{i=1}^n p_{d_i}} - \theta^2. \quad (13)$$

Після множення лівої та правої частини формули (13) на $\frac{\sum_{i=1}^n p_{d_i}}{n}$ та взяття їх під знак квадратного кореня, можна отримати залежність

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n p_{d_i} (d'_i)^2}{n}} = \sqrt{\left(\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n p_{d_i} d_i^2}{n}} \right)^2 - \theta^2 \frac{\sum_{i=1}^n p_{d_i}}{n}}, \quad (14)$$

а з урахуванням (7) та (10), причому в знаменнику (10) поставити n , то (14) набуде вигляду

$$\mu' = \sqrt{\mu^2 - \theta^2 \frac{\sum_{i=1}^n p_{d_i}}{n}}. \quad (15)$$

Як видно з лівих частин формул (14) та (15), для визначення СКП одиниці ваги μ' за різницями d'_i подвійних вимірів, звільнених від систематичної похибки θ , надлишковими є всі n різниць d'_i . З іншого боку, різниці d'_i , звільнені від систематичної похибки, ще більше наближаються до істинних похибок, ніж різниці d_i , а тому всі вони повинні бути надлишковими.

Таким чином, у формулі (15) величина μ є загальною СКП одиниці ваги, μ' – випадковою складовою СКП одиниці ваги, а вираз $\sqrt{\theta^2 \frac{\sum_{i=1}^n p_{d_i}}{n}}$ – систематичною складовою СКП одиниці ваги (надалі – систематичною складовою).

Відомо, що систематична складова не повинна перевищувати $1/5 = 0,2$ від загальної СКП μ , що приймається як необхідна умова незначного впливу систематичної складової та приймається як стандарт в роботах [4; 5; 7; 8], то

$$\sqrt{\theta^2 \frac{\sum_{i=1}^n p_{d_i}}{n}} \leq 0,2\mu. \quad (16)$$

Тому можна стверджувати про утворення ще одного критерію наявності незначної систематичної похибки θ у різницях подвійних нерівноточних вимірів у вигляді

$$|\theta| \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n p_{d_i}}{n}} \leq 0,2\mu, \quad (17)$$

або у більш зручному для розрахунків вигляді з урахуванням (7) та (8)

$$\left| \sum_{i=1}^n p_{d_i} d_i \right| \leq 0,2 \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n p_{d_i} d_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n p_{d_i}}. \quad (18)$$

Зрозуміло, що в усіх наведених формулах радикали повинні мати лише додатні значення.

У випадку подвійних рівноточних вимірювань $p_i = 1$ і вираз (17) трансформується у

$$\theta \leq 0,2\mu, \quad (19)$$

що і покладено в основу кількох критеріїв для рівноточних подвійних вимірів [4; 5; 8], де μ розглядається як СКП однієї різниці.

Для досягнення поставленої мети було проведене математичне моделювання. За вихідну вибірку було взято ту, яка наведена в [4] на сторінці 183, утвореної в результаті вимірювання ліній теодолітного ходу в прямому та зворотному напрямках. У стовпчиках 2–4 табл. 1 наведено різниці d_i , значення ваг p_{d_i} , різниць та добутки $p_{d_i}d_i$ з прикладу [4].

Таблиця 1

Вихідна вибірка та результати математичного моделювання для $\theta = +1,26$

N	p_d	d , см	$p_d d$, см	d' , см	$\sqrt{p_d}$	$d'+c=$ d'' , см	$p_d d''$, см	$ p_d d'' $, см	$d''\sqrt{p_d}$, см	$ d''\sqrt{p_d} $, см	$p_d (d'')^2$, см
1	0,26	9	2,35	8,68	0,511	9,94	2,60	2,60	5,08	5,08	25,81
2	0,76	2	1,52	1,68	0,872	2,94	2,23	2,23	2,56	2,56	6,54
3	0,42	6	2,54	5,68	0,650	6,94	2,93	2,93	4,51	4,51	20,33
4	0,29	-7	-2,04	-7,32	0,540	-6,06	-1,77	1,77	-3,27	3,27	10,72
5	0,54	-4	-2,17	-4,32	0,737	-3,06	-1,66	1,66	-2,26	2,26	5,10
6	0,38	5	1,90	4,68	0,617	5,94	2,26	2,26	3,66	3,66	13,39
7	0,63	3	1,88	2,68	0,791	3,94	2,46	2,46	3,11	3,11	9,69
8	0,32	-7	-2,26	-7,32	0,568	-6,06	-1,96	1,96	-3,44	3,44	11,86
9	0,59	-4	-2,36	-4,32	0,767	-3,06	-1,80	1,80	-2,35	2,35	5,53
Σ	4,20		1,36		6,05		5,29	19,67	7,59	30,25	108,97

Визначено значення систематичної похибки за формулою (8), яке становило $\theta = 0,32$ см. Надалі виконувалось математичне моделювання з використанням програмного засобу Excel [11]. До значень d'_i , звільнених від θ ($d'_i = d_i - \theta$) (стовпчик № 5), додавались додатні величини c з дискретністю 0,01 см (стовпчик № 7), імітуючи появу нової систематичної похибки θ ($c = \theta$). У стовпчиках 8–12 виконувались обчислення, необхідні для реалізації наведених вище критеріїв. У цих же стовпчиках табл. 1 наведено числові значення згідно з $c = \theta = +1,26$ см.

У табл. 2 представлені результати математичного моделювання.

Таблиця 2

Результати математичного моделювання

№ формули	c , см	Значення критерію		μ , см	$ \theta \cdot \sqrt{\frac{\sum p_d}{n}} / \mu$
		ліва частина	права частина		
1	1,17	4,91	4,90	3,47	0,23
2	50	209,76	289,31	34,30	-
3	50	209,76	256,02	34,30	-
4	1,26	7,59	7,56	3,48	0,25
5	50	302,59	347,46	34,30	-
6	0,70	0,700	0,681	3,41	0,14
17	1,02	0,696	0,689	3,44	0,20
18	1,02	4,28	4,23	3,44	0,20

$\mu' = 3,38$ см, $t_\beta = 2,26$ – для $n = 9$ та довірчої ймовірності $P = 0,95$

З їх результатів видно, що критерій за формулою (6) показав наявність найменшого значення систематичної похибки $\theta = c = 0,70$ см серед інших критеріїв. Загальна СКП одиниці ваги становила $\mu = 3,41$ см. Відношення систематичної складової до значення загальної СКП одиниці ваги дорівнює 0,14 (нижче стандарту 0,2). Значення $\theta = 1,02$ см показав кри-

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

терій за формулою (17) та його модифікація з формулою (18), які можна вважати рівноцінними. Значення $\mu = 3,44$ см – відношення систематичної складової до значення загальної СКП одиниці ваги становило 0,20 (стандартне значення). $\theta = 1,17$ см як значну систематичну похибку зареєстрував критерій за формулою (1). Загальна СКП одиниці ваги $\mu = 3,47$ см, відношення систематичної складової до значення загальної СКП одиниці ваги дорівнює 0,23 (вище стандарту 0,2). Останнім зреагував на наявність систематичної складової $\theta = 1,26$ см критерій за формулою (4). Значення $\mu = 3,48$ см, відношення систематичної складової до значення загальної СКП одиниці ваги дорівнює 0,25 (вище стандарту 0,2).

Критерії за формулами (2), (3) та (5) не показують наявності систематичної похибки взагалі. У табл. 2 для прикладу наведено $\theta = 50$ см – надвелике значення систематичної похибки, а вказані критерії показують її відсутність.

Можна спрогнозувати можливість застосування критеріїв (2), (3), (5) для конкретної вибірки з таких міркувань. Нехай додатне значення c збільшується та збільшує величини $d_i = d'_i + c$ доти, поки одне або кілька значень різниць d_i (раніше від'ємних) дорівнюватимуть нулю, а інші будуть додатними. Це означає стовідсоткову присутність у різницях d_i значної систематичної похибки. Тоді

$$\left| \sum_{i=1}^n p_{d_i} d_i \right| = \sum_{i=1}^n |p_{d_i} d_i|, \quad (20)$$

$$\left| \sum_{i=1}^n d_i \cdot \sqrt{p_{d_i}} \right| = \sum_{i=1}^n |d_i \cdot \sqrt{p_{d_i}}|. \quad (21)$$

Підстановка виразів (20) та (21) у формули (2), (3), (5) та нескладні перетворення дозволяють визначити умови, за якими в конкретній вибірці критерії за формулами відповідно (2), (3), (5) можуть показати присутність значної систематичної похибки θ , яка може бути більшою, ніж та, яка фактично міститься в різницях d_i :

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n p_{d_i}} > 1,25 \cdot t_{\beta}; \quad (22)$$

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n p_{d_i}} > 2,5; \quad (23)$$

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n \sqrt{p_{d_i}}} > 1,25 \cdot t_{\beta}. \quad (24)$$

Невиконання відповідного критерію нерівності (22)–(24) свідчить про те, що критерій у цій вибірці не працює, і буде вказувати на незначну величину систематичної похибки θ , навіть якщо вона завелика. Так, підстановка значень параметрів вибірки, представленої в табл. 1, у нерівність (22) дозволяє отримати $2,05 < 2,82$; у нерівність (23) дає $2,05 < 2,5$; у нерівність (24) – значення $2,46 < 2,82$. Оскільки нерівності (22)–(24) не виконуються, то критерії за формулами (2), (3), (5) є непридатними для вибірки, наведеної в табл. 1, про що свідчать і результати математичного моделювання, наведені у табл. 2. Якщо ж, наприклад, збільшити ваги p_{d_i} втричі, то згідно з (22)–(24): $3,5 > 2,8$; $3,5 > 2,5$; $3,2 > 2,8$ відповідно. Дійсно, результати математичного моделювання для цього випадку, які наведені в табл. 3, вказують на виявлення критеріями (2), (3), (5) значної систематичної похибки (стовпчик № 2), введеної в різницях подвійних вимірювань.

Результати математичного моделювання для критеріїв (2), (3), (5)

№ формули	с, см	Значення критерію		μ, см	$ \theta \cdot \sqrt{\frac{\sum p_d}{n}} / \mu$
		ліва частина	права частина		
2	4,12	51,85	51,80	7,61	0,757
3	3,59	45,18	45,05	7,22	0,696
5	5,24	54,87	54,86	8,51	0,861

$\mu' = 3,38$ см, $t_\beta = 2,26$ - для $n = 9$ та довірчої ймовірності $P = 0,95$, $\sum p_d = 12,59$

Однак ці критерії виявляють занадто значні систематичні похибки від 3,59 см до 5,24 см та відношення систематичної складової до загальної СКП одиниці ваги значно більші за стандарт 0,2, що неприпустимо. Таким чином, здатність критеріїв (2), (3), (5) виявити значну систематичну похибку залежить від співвідношень між параметрами розподілу, а саме: суми ваг та коефіцієнта Стьюдента.

Критерії за формулами (1) та (4) за умови (20) та (21) відповідно дозволяють отримати ту ж саму нерівність $1 > 0,25$, що і відповідає появі дуже значної систематичної складової без якихось вимог до співвідношення між параметрами розподілу. Проте критерії за формулами (1) та (4) отримані на підставі співвідношень між параметрами нормального розподілу. Це збільшує ризик їх використання, якщо закон розподілу різниць дещо відрізняється від нормального, що характерно для малих за об'ємом вибірок, та в разі, коли різниці підкоряються іншому законові розподілу.

Стосовно критерію за формулами (17) та похідного від нього за формулою (18). Для рівних правої та лівої частини формули (17) з формули (15) випливає

$$\mu' = \sqrt{\mu^2 - (0,2\mu)^2} = \mu\sqrt{0,96} = 0,98\mu. \quad (25)$$

Тобто виконання нерівності (17) дозволяє обмежити виявлення систематичної похибки θ в різницях на рівні не більше 0,2 від загальної СКП одиниці ваги μ . Це може спотворити її не більше ніж на $(1 - 0,98) \cdot 100 \% = 2 \%$, якщо вважати систематичну похибку θ незначною та не вилучати її з різниць d_i . Обмежень на наявність якихось співвідношень між параметрами вибірки критерій немає. При теоретичному обґрунтуванні цього критерію не враховувались будь-які співвідношення, притаманні тому чи іншому законові розподілу. Тому цей критерій є стабільним до значення систематичної складової на рівні стандарту 0,2 від загальної СКП одиниці ваги μ у будь-якому випадку.

Критерій за формулою (6) має свої особливості. Для рівних правої та лівої частин виразу (6) та з формули (15) випливає

$$\mu' = \sqrt{\mu^2 - (0,2\mu)^2 \frac{\sum_{i=1}^n p_{d_i}}{n}} = \mu \sqrt{1 - 0,04 \frac{\sum_{i=1}^n p_{d_i}}{n}}. \quad (26)$$

Тоді у випадку, коли $\sum_{i=1}^n p_{d_i} = n$ -критерій має ознаки критерію (17). Якщо $\sum_{i=1}^n p_{d_i} < n$, то число під квадратним коренем буде більше від 0,96 і критерій буде реагувати на меншу систематичну похибку θ , ніж попередній критерій, вважаючи її значною. Якщо ж $\sum_{i=1}^n p_{d_i} > n$, то навпаки, критерій вкаже на наявність більшої систематичної похибки.

Таким чином, здатність цього критерію до виявлення значної систематичної похибки залежить від таких параметрів вибірки, як сума ваг та об'єм вибірки.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Висновки відповідно до статті. За результатами математичного моделювання встановлено, що відомі критерії в тій самій вибірці відмічають різні значення значної систематичної похибки геодезичних вимірів. Деякі з них взагалі не вказують на наявність навіть великої за значенням систематичної похибки у вибірці, оскільки залежать від співвідношення таких параметрів вибірки, як сума ваг та коефіцієнт Стюдента. За результатами теоретичних досліджень було отримано новий критерій для виявлення залишкових систематичних похибок у різницях подвійних нерівноточних вимірів. Цей критерій, на відміну від існуючих, є стабільним до значення систематичної складової одиниці ваги на рівні 0,2 від загальної СКП одиниці ваги незалежно від параметрів вибірки та закону розподілу різниць подвійних вимірів.

Список використаних джерел

1. Шульц Р. В., Терещук О. І., Анненков А. О., Нисторьяк І. О. Практичні дослідження точності визначення координат за супутниковими технологіями у реальному часі. *Інженерна геодезія*. 2014. № 61. С. 58–77.
2. Терещук О. І., Нисторьяк І. О., Шульц Р. В. Відновлення міських полігонометричних мереж сучасними супутниковими технологіями. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. Львів, 2015. Вип. 82. С. 59–72.
3. Крячок С. Д., Мамонтова Л. С. Побудова полігонометричних мереж зустрічними ходами. *Вісник геодезії та картографії*. 2014. № 5. С. 9–12.
4. Войтенко С. П. Математична обробка геодезичних вимірів. Теорія похибок вимірів: Навчальний посібник. Київ: КНУБА, 2003. 216 с.
5. Большаков В.Д. Теория ошибок наблюдений: учебник для вузов. Москва: Недра, 1983. 223 с.
6. Рябій В. А., Рябій В. В. Математичне опрацювання результатів подвійних нерівноточних вимірів. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. 2015. Вип. I (29). С. 33–38.
7. Зозуляк М. П., Гавриш В. І., Євсєєва Е. М., Йосипчук М. Д. Основи математичного опрацювання геодезичних вимірювань: Навчальний посібник. Львів: Растр 7, 2007. 408 с.
8. Гайдаев П. А., Большаков В. Д. Теория математической обработки геодезических измерений: учебник для вузов. Москва: Недра, 1969. 400 с.
9. Видуев Н. Г., Кондра Г. С. Вероятностно-статистический анализ погрешностей измерений. Москва: Недра, 1969. 320 с.
10. Рябій В. А., Рябій В. В. Математичне опрацювання результатів подвійних рівноточних вимірів. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2015. Вип. 81. С. 74–81.
11. Жученко А. І., Ярощук Л. Д. Опрацювання параметрів та перевірка статистичних гіпотез. Теорія та практика роботи з MathCAD, MatLab, MS Excel: навч. посіб. Київ: НТУУ «КПІ», 2012. 156 с.

References

1. Shults, R. V., Tereshchuk, O. I., Annenkov, & A. O., Nystoriak, I. O. (2014). Praktychni doslidzhennia tochnosti vyznachennia koordynat za suputnykovymy tekhnolohiiamy u realnomu chasi [Practical studies of the accuracy of coordinate determination by satellite technology in real time]. *Inzhenerna heodeziia – Engineering geodesy*, 61, 58–77 [in Ukrainian].
2. Tereshchuk, O. I., Nystoriak, I. O., & Shults, R. V. (2015). Vidnovlennya mis'kykh polihonometrychnykh merezh suchasnymy suputnykovymy tekhnolohiiamy [Reconstruction of urban polygonometric networks with modern satellite technologies]. *Heodeziya, kartohrafiya ta aro-fotoznimannya - Geodesy, cartography and aerial photography*, 82, 59-72 [in Ukrainian].
3. Kryachok, S. D., & Mamontova, L. S. (2014). Pobudova polihonometrychnykh merezh зустрічними khodamy [Construction of polygonometric networks with counter moves]. *Visnyk heodeziyi ta kartohrafiyi - Herald of Geodesy and Cartography*, 5, 9–12 [in Ukrainian].
4. Voytenko, S. P. (2003). *Matematychna obrobka heodezychnykh vymiriv. Teoriya pokhybok vymiriv [Mathematical processing of geodetic measurements. Theory of measurement errors]*. Kyiv: KNUBA [in Ukrainian].
5. Bol'shakov, V.D. (1983). *Teoriya oshibok nablyudeniya [Theory of observation errors]*. Moscow: Nedra [in Russian].
6. Ryabiy, V.A., & Ryabiy, V.V. (2015). Matematychne opratsyuvannya rezul'tativ podviynykh nerivnotochnykh vymiriv [Mathematical analysis of the results of double non-uniform measurements]

Cuchasni dosyahnennya heodezychnoyi nauky ta vyrobnytstva – Contemporary achievements in geodetic science and production, 1 (29), 33-38 [in Ukrainian].

7. Zazulyak, P.M. (2007). *Osnovy matematychnoho opratsyuvannya heodezychnykh vymiryuvan [Fundamentals of mathematical processing of geodetic measurements]*. Lviv: Rastr [in Ukrainian].

8. Gaydaev, P.A. & Bol'shakov V.D. (1969). *Teoriya matematicheskoy obrabotki geodezicheskikh izmereniy [The theory of mathematical processing of geodetic measurements]*. Moscow: Nedra [in Russian].

9. Viduyev, N.G., & Kondra, G.S. (1969). *Veroyatnostno-statisticheskii analiz pogreshnostey izmereniy [Probabilistic-statistical analysis of measurement errors]*. Moscow: Nedra [in Russian].

10. Ryabiy, V.A., & Ryabiy, V.V. (2015). *Matematychna obrobka rezul'tativ podviynykh rivnotochnykh vymiriv [Mathematical treatment of the results of double homogeneous measurements]*. *Heodeziya, kartohrafiya i aerofotoznimannya – Geodesy, cartography and aerial photography*, 81, 74-81 [in Ukrainian].

11. Zhuchenko A.I., & Yaroshchuk, L. D. (2012). *Opratsyuvannya parametriv ta perevirka statystychnykh hipotez. Teoriya ta praktyka roboty z MathCAD, MatLab, MS Excel [Working out parameters and checking statistical hypotheses. The theory and practice of working with MathCAD, MatLab, MS Excel]*. Kyiv: NTUU "KPI" [in Ukrainian].

UDC 528.1

Serhiy Kryachok

RESEARCHES OF CRITERIA FOR DETERMINATION OF RESIDUAL SYSTEMATIC ERRORS IN THE RESULTS OF DOUBLE GEODETIC MEASUREMENTS UNEQUAL ACCURACY

Urgency of the research. In order to obtain reliable measurement results, it is necessary to use not only modern automated and highly accurate geodetic instruments, but also to apply mathematical processing methods, which ultimately guarantee the accuracy of measurement results. The main tasks of mathematical processing of geodetic measurements is the calculation of their probable value close to the true, as well as determining the accuracy of the measured values.

Target setting. Sometimes in the practice of geodetic works, quantities are measured twice. Thus, a series of double measurements is formed, by which one can determine their differences and perform an accuracy estimate. The systematic errors contained in the differences of double measurements can be partially compensated, but the residual systematic components can be significant. Therefore, to identify residual systematic errors apply various criteria.

Actual scientific researches and issues analysis. The latest publicly available publications were reviewed, which provided criteria for identifying residual systematic errors in the differences of double geodetic measurements unequal accuracy.

The research objective. The reasons for the disagreement of the criteria in identifying significant systematic errors in the results of double geodetic measurements unequal accuracy in the same sample are not investigated.

The statement of basic materials. Theoretical studies have been carried out and a new criterion has been created to identify a significant systematic error in the double unequal dimensions geodetic measurement and its modification. As a source of data for mathematical modeling, have was used a known sample of 9 differences of double measurements unequal accuracy. The systematic error is determined as the average weight and is removed from the differences. By adding a constant value to each corrected difference, residual systematic errors were simulated. The left and right sides of each of the six known criteria and the new criterion with its modification were calculated. Thus, mathematical modeling was performed on a personal computer using MS Excel software.

Conclusions. Theoretical studies have been carried out and a new criterion has been created to identify a significant systematic error in the double unequal dimensions geodetic measurement and its modification. Some of them do not even note the existence of a large systematic error because they depend on the ratio of such sampling parameters as the sum of the weights and the Student's coefficient. As a result of theoretical studies, a new criterion was obtained for identifying significant systematic errors in the differences of double measurements unequal accuracy and its modification. This criterion, in contrast to the considered ones, is stable relative to the value of the systematic component of the unit of weight at the level of 0.2 of the total mean square error of the unit of weight. It does not depend on the parameters of the sample and the law of distribution of the differences in double measurements.

Keywords: theory of geodetic measurement errors; mean square error; systematic error; double measurements unequal accuracy; math modeling.

Table: 3. References: 11.

Крячок Сергій Дмитрович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри геодезії, картографії та землеустрою, Чернігівський національний технологічний університет. (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).
Kryachok Serhiy – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of geodesy, cartography and land management, Chernihiv national University of Technology. (95 Shevchenko Str., 14035, Chernihiv, Ukraine).
E-mail: geodesist2015@gmail.com
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5633-1501>
ResearcherID: N-3061-2016

Валерій Дешко, Інна Білоус, Олександра Максименко

СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ СИСТЕМИ ОПАЛЕННЯ БАГАТОКВАРТИРНИХ ЖИТЛОВИХ БУДИНКІВ

Актуальність теми дослідження. Сучасний стан багатоквартирних житлових будинків (ЖБ), побудованих до кінця 90-х років, потребує повної або часткової модернізації та значного підвищення енергоефективності. Крім заходів з енергозбереження, які активно впроваджуються як для будинку загалом, так і окремими власниками квартири, є проблема з розподілом теплоти між квартирами системами теплопостачання ЖБ.

Постановка проблеми. Для умов централізованого теплопостачання в Україні типовим є недотримання температурного графіка подачі теплоносія, який відповідає проектним вимогам, і спроби забезпечення умов комфортності мешканцями індивідуально, без урахування системних зв'язків у центральному опаленні будівлі. Зважаючи на це, у роботі проведено аналіз показників роботи однотрубної проточної системи опалення та дотримання умов комфортності при експлуатації типової багатоквартирної 12-поверхової будівлі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Враховуючи, що для підвищення рівня енергоефективності ЖБ значна увага приділяється питанням термосанації, питання розподілу теплоти в інженерних мережах будівлі лишаються недостатньо висвітленими та проаналізованими.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Недотримання температурних графіків систем опалення в багатоквартирних будинках із частковою заміною опалювальних приладів.

Постановка завдання. Визначення відхилень в умовах експлуатації системи опалення будівель та створення математичної моделі розрахунку, яка дозволяє визначити та аналізувати тепловий стан приміщень багатоквартирних житлових будинків.

Вклад основного матеріалу. Метою цієї роботи є аналіз показників роботи системи однотрубної проточної системи опалення та дотримання умов комфортності типових багатоквартирних житлових будинків.

Висновки відповідно до статті. У роботі проведено аналіз показників роботи однотрубної проточної системи опалення та дотримання умов комфортності при експлуатації типової багатоквартирної будівлі. Для системного аналізу цих впливів за різних умов експлуатації в програмному середовищі Mathcad розроблено математичну модель для визначення теплового стану приміщень будівлі на прикладі одного стояка.

Ключові слова: теплове навантаження; витрата теплоносія; багатоквартирні будинки; точкова модернізація; умови комфортності; система опалення.

Рис.: 5. Табл. 3. Бібл.: 15.

Актуальність теми дослідження. Сучасний стан житлової сфери України нині переживає складний та багатогранний процес реформування (табл. 1). Останніми роками спостерігається підвищена увага забудовників до проблеми енергоефективності будівель і, відповідно, використання сучасних методів будівництва та технічного оснащення будинків, які дозволяють суттєво скоротити споживання енергії в будинку, а також покращити умови проживання й оптимізувати витрату коштів мешканців будинку на оплату житлово-комунальних послуг.

Постановка проблеми. У житловому фонді країни накопичились проблеми економічного, організаційного, соціального та технологічного походження:

1) застарілість технологій, фізичне та моральне старіння конструкцій та внутрішньо будинкових інженерних систем житлових будівель (близько 75 % житлового фонду України було зведено до 90-х років, коли вимогам щодо енергоефективності будівель не приділялась належна увага, і понад третина житлових будинків потребують не лише термомодернізації, але й капітального ремонту);

2) низькі теплозахисні властивості огорожувальних конструкцій у порівнянні із сучасними нормами [1];

3) відсутність належного догляду як за будинком, так і за інженерними системами, соціальний фактор (наприклад, втручання в систему опалення, заміна радіаторів);

4) відсутність засобів обліку теплової енергії та відсутність у споживачів технічної можливості для керування споживанням теплової енергії (енергоємність послуг у 2,5–3,0 рази перевищує показники розвинених країн) [2; 3] та інше.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Прийняті нові Закони України [4–7], розроблено систему стандартів [8; 9] та ДБН [1] щодо організації енергоменеджменту та енергоаудиту, енергопаспортизації та сертифікації будівель, підвищення енергоефектив-

ності теплоізоляційної оболонки та інженерних комунікацій. Враховуючи, що для підвищення рівня енергоефективності ЖБ значна увага приділяється питанням термосанації, питання розподілу теплоти в інженерних мережах будівлі лишаються недостатньо висвітленими та проаналізованими.

Таблиця 1

Основні напрямки державної політики підвищення енергоефективності та енергозбереження в житлово-комунальному господарстві

Напрямки	Шляхи
Технічний	надійне та безпечне технічне переоснащення галузі; модернізація або повна заміна енергоємного обладнання; запровадження новітніх енергоефективних та енергозберігаючих технологій; зменшення витрат та втрат ПЕР.
Економічний	створення сприятливих умов для всебічного залучення інвестицій на проекти з впровадження у сферу енергозбереження та енергоефективності в будинках; удосконалення системи управління в галузі з урахуванням ринкових відносин.
Законодавчий	удосконалення правової бази, роз'яснення регулятивних актів; узгодження політики підвищення енергоефективності на різних рівнях; дотримання вимог нормативно-правових актів у сфері енергозбереження, що спрямована на стимулювання енергоефективних технічних рішень.
Організаційний	корегування основних заходів з енергоефективності та енергозбереження; формування енергозаощаджуючого огляду в суспільстві; формування інформаційного забезпечення поширення енергетичного менеджменту.

Згідно з даними державної статистики України близько 40 % житлового фонду України – це багатоквартирні житлові будинки, в яких мешкає більше ніж 47 % населення країни, яке й споживає найбільше традиційної, невідновлювальної енергії, необхідно насамперед розробити механізми енергозбереження в цьому фонді. З них 80 % багатоквартирного житлового фонду потребує повної або часткової модернізації та значного підвищення енергоефективності [10].

При термомодернізації наявного фонду основна увага приділяється утепленню огороджувальних конструкцій та заміні вікон. Разом з тим одним із ключових питань є модернізація системи опалення (СО), яка відіграє головну роль у забезпеченні теплового комфорту приміщень та за рахунок регулювання якої забезпечується економія споживання енергії. Тому необхідно звернути увагу на проблеми цих систем:

- відповідність проектним температурних та гідравлічних характеристик елементів системи опалення будинку (стояки, опалювальні прилади, витрати теплоносія та інше);
- наявність та ефективність роботи системи контролю та регулювання параметрів системи опалення в місцевому (індивідуальному) теплопункті;
- відповідність проектним реальних температурних графіків відпуску теплової енергії. Проектні графіки вписані в режимні карти роботи обладнання, за цими температурними графіками визначаються параметри роботи системи тепlopостачання при видачі технічних умов на підключення до мереж, на встановлення теплових лічильників та індивідуальних теплових пунктів.

При цьому переважна більшість централізованих систем тепlopостачання працює на занижених щодо проектних температурних графіків, але фактичні температури теплоносія теплових мереж не відповідають і цим умовам.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Потрібно зазначити, що потребує додаткової уваги комплексне питання недотримання температурних графіків систем опалення в багатоквартирних будинках із частковою заміною опалювальних приладів.

Постановка завдання (мета статті). Головною метою роботи є аналіз показників роботи системи опалення та дотримання умов комфортності при експлуатації типових багатоквартирних будинків.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Для досягнення поставленої мети були поставлені такі **завдання**:

- 1) провести енергоаудит типової багатоквартирної будівлі;
- 2) виявити відхилення в умовах експлуатації від проектних у роботі системи опалення;
- 3) розробити математичну модель для визначення теплового стану приміщень будівлі з вертикальною однотрубною системою опалення;
- 4) визначити вплив відхилень умов експлуатації від проектних на рівень параметрів опалення і температур приміщення.

Виклад основного матеріалу. Об'єктом проведення енергоаудиту було вибрано окремо розташовану житлову багатоквартирну будівлю у м. Києві, яка була введена в експлуатацію в 1993 році. Будівля являє собою 12-поверхову споруду, побудовану за індивідуальним проектом із панельним перекриттям, цегляними стінами та лоджіями без складних архітектурно-планувальних чи конструктивних рішень. На першому поверсі розташовані підприємства сфери послуг. Будинок має 4 під'їзди, сумарно 175 квартир (431 кімната), загальною опалювальною площею 12 429 м². СО – вертикальна однотрубна, з проточною схемою підключення опалювальних приладів (ОП) (радіатори типу МС–140), тепловий пункт з елеваторним вузлом та теплолічильником). Як модель обране житлове приміщення, характеристики огорожувальних конструкцій якого наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Характеристика огорожувальних конструкцій об'єкта дослідження

Конструктивний елемент	Опис (товщини та коефіцієнти теплопровідності)	Термічний опір	Площі
Зовнішні стіни	Плитка керамічна: $\delta=0,02$ м, $\lambda=0,64$ Вт/(м·°С); розчин бетонний: $\delta=0,01$ м, $\lambda=0,93$ Вт/(м·°С); цегла пустотіла: $\delta=0,51$ м, $\lambda=0,58$ Вт/(м·°С); шпаклівка: $\delta=0,05$ м, $\lambda=0,81$ Вт/(м·°С).	$R = 1,14$ (м ² ·°С)/Вт	$F_{ст} = 5,35$ м ²
Вікна	Металопластикові, дерев'яні (близько 20%)	$R = 0,34$ (м ² ·°С)/Вт	$F_{вік} = 1,8$ м ²

На основі даних теплолічильника за 1,5 року було проведено аналіз фактичної температури подачі та зворотної води в систему опалення залежно від зовнішньої температури.

На рис. 1 наведено: 1, 2 – температурний графік «95–70» [11], який відповідає проектним умовам СО будівлі; 3, 4 – «Температурний графік теплових мереж», адекватний реальній потребі споживачів» [12], згідно з даними теплових мереж ПАТ «Київенерго» 2017/2018 рр.; 5, 6 – фактичні температури подачі води в СО в тепlopункті та зворотної води.

Порівняння кривих 3, 5 показує, що при високих температурах зовнішнього повітря фактична температура подачі води вища за декларовану ПАТ «Київенерго», а для холодного періоду вони збігаються. Ці графіки знижують рівень теплопостачання в порівнянні з проектним графіком «95–70».

Зниження фактичної температури води в зворотному трубопроводі СО (крива 6) у порівнянні з кривою 4 свідчить про зменшення фактичної витрати теплоносія від проектної майже в 1,2 раза, що було підтверджено результатами енергоаудиту.

Враховуючи цю ситуацію, у третині квартир мешканці проводили заміну ОП, збільшуючи їхню потужність у середньому на 50 %. Має місце встановлення додаткових ОП на закритих лоджіях.

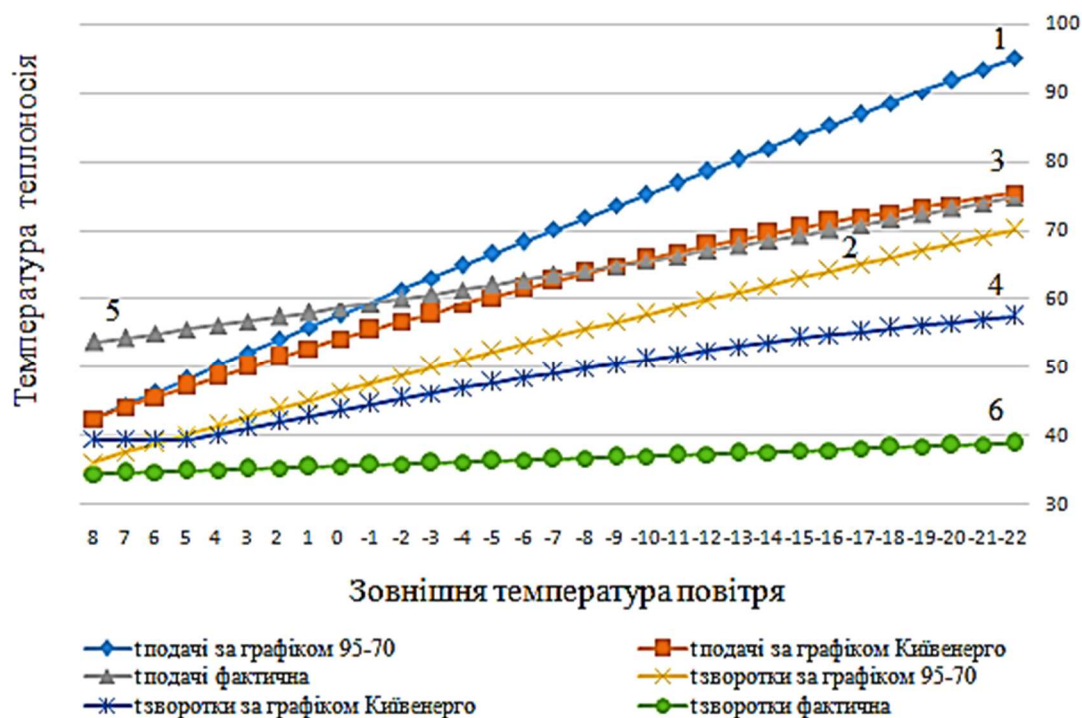


Рис. 1. Температурні графіки теплопостачання за графіком теплових мереж

Проблема недотримання температурних графіків у багатоквартирних будинках із частковою заміною ОП є типовою і для її аналізу розроблено математичну модель та проведено розрахунки, які наведені далі.

Опис моделі.

Завданням математичного моделювання є оцінка проблем і наслідків точкової внутрішньобудинкової модернізації ОП та відхилення від проектних параметрів постачання теплоносія.

У математичній моделі розглядається стояк однострубною СО, який проходить крізь однакові житлові приміщення дванадцятиповерхового будинку. Ця модель дозволяє визначити температури теплоносія на вході та виході з ОП, тепловий потік від ОП та внутрішню температуру повітря в приміщеннях. Математична модель написана для стаціонарного стану без врахування сонячних теплонадходжень.

У рівнянні теплового балансу приміщень враховується тепловий потік від ОП і теплові втрати через зовнішні огороження. Система рівнянь теплового балансу: теплопередачі від ОП до повітря у кімнаті (1) та від кімнати назовні (2), теплового потоку від води до ОП (3), яка записана для 12 поверхів.

$$Q = Q_p \cdot \left[\frac{t_n + t_{36} - t_{6H}}{70} \right]^{1,3} \quad (1-3)$$

$$Q = h \cdot (t_{6H} - t_{30вн})$$

$$Q = m \cdot c \cdot (t_n - t_{36})$$

де Q_p – номінальний тепловий потік ОП при $\Delta t = 70^\circ\text{C}$, кВт/м²;

$\Delta t = \frac{t_n + t_{36}}{2}$ – середня температура ОП, $^\circ\text{C}$;

t_n – температура теплоносія на вході в ОП, $^\circ\text{C}$;

t_{36} – температура теплоносія на виході з ОП, $^\circ\text{C}$;

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

$t_{вн}$ – внутрішня температура повітря в приміщенні, °С.

$t_{зовн}$ – зовнішня температура повітря в приміщенні, °С;

m – витрата теплоносія через стояк, кг/с;

$c = 4,183$ кДж/кг·°С – питома теплоємність теплоносія (води).

h – приведений коефіцієнт теплової провідності огородження, визначається згідно з характеристикою огороджувальних конструкцій, наведених у табл. 2 та формулою (4) [13; 14].

$$h = h_{tr} + h_{vent}, \quad (4)$$

де h_{tr} – загальний коефіцієнт теплопередачі зовнішніх огороджувальних конструкцій, Вт/К;

h_{vent} – загальний коефіцієнт теплопередачі вентиляцією, Вт/К.

$$h_{tr} = \sum_{j=1}^m A_s \cdot \frac{1}{R_{se} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + R_{is}} + U_w \cdot A_w, \quad (5)$$

де $R_{is} = 0,17$ (м²·К) /Вт – тепловий внутрішній поверхневий опір [14];

$R_{se} = 0,043$ (м²·К) /Вт – тепловий зовнішній поверхневий опір [14];

$U_w = 2,94$ Вт/ (м²·К) – коефіцієнт теплопередачі світлопрозорого огородження [15];

A_s, A_w – площі світлопрозорих та непрозорих огорожень відповідно;

δ – товщина i -го шару елементу непрозорої конструкції, м;

λ – теплопровідність матеріалу i -го шару непрозорої конструкції, Вт/(м²К);

n – кількість шарів конструкції;

i – порядковий номер шару конструкції;

m – кількість зовнішніх непрозорих елементів огорожень через які втрачається тепло;

j – порядковий номер зовнішніх непрозорих огорожень.

$$h_{vent} = 0,34 \cdot V \cdot n, \quad (6)$$

де $V = 30,6$ м³ – внутрішній об'єм приміщення,

$n = 1$ год⁻¹ – кратність повітрообміну.

Визначений при розрахункових умовах із рівняння (2) тепловий потік дозволяє визначити номінальний тепловий потік ОП Q_p при стандартному температурному напорі ОП 70°С як характеристику опалювального приладу для кожного поверху.

Для розрахункових умов задається: температура розрахункового зовнішнього повітря $t_{p.o} = -22$ °С, температура повітря в приміщенні $t_{вн}^{проект} = 18$ °С, температура на вході і виході зі стояка. По цих даних розраховується перепад температур у кожному опалювальному приладі, витрата води через стояк і номінальний тепловий потік ОП.

Результати розрахунків.

За допомогою системи рівнянь (1–3) визначено зміну температур у кожному ОП, теплові потоки від радіаторів, а також температуру внутрішнього повітря в приміщеннях для 12 поверхів при різних відхиленнях в умовах експлуатації, які відповідають їхнім фактичним значенням.

Розрахунки проведено для даних, представлених у табл. 3. Витрата води через стояк 0,106 кг/с відповідає проектним умовам, а 0,084 кг/с – фактичним. При температурі зовнішнього повітря відповідно -18°С та 0°С температура подачі теплоносія в стояк: 85 °С та 58,5 °С відповідає проектному температурному графіку СО (рис. 1); 72,7 °С та 54,1 °С – температурному графіку теплових мереж; 68,8 °С та 50,9 °С – фактичному температурному графіку з урахуванням охолодження води в подавальному трубопроводі від теплопункту.

Вихідні дані для розрахунків

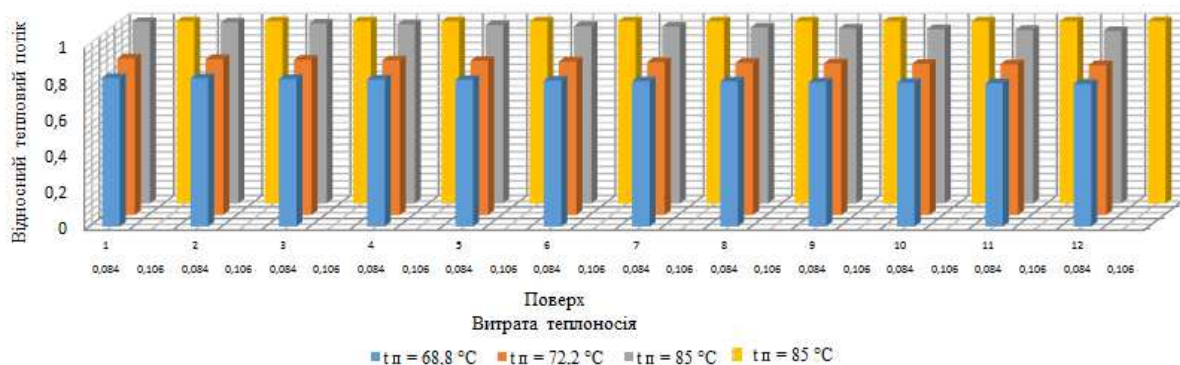
Температура зовнішнього повітря $t_{зовн}$, °C	Витрата теплоносія через стояк m , кг/с	Температура подачі теплоносія у стояк t_n , °C
-18	0,106	85
	0,084	85
		72,7
		68,8
0	0,106	58,5
	0,084	58,5
		54,1
		50,9

Результати розрахунків теплових потоків у приміщеннях, наведені у відносних одиницях щодо $Q_p = 0,740$ кВт, що відповідає розрахунковим даним, наведено на рис. 2.

Відносне значення проектного теплового потоку від ОП при $t_{зовн} = -18$ °C становить 0,88. При проектній температурі подачі та фактичному зменшенні витраті теплоносія на 19 % тепловий потік від ОП зменшується від 12 до 1 поверху і знаходиться в межах від 0,885 до 0,846 (рис. 2, а). За умови теплопостачання за графіком, що декларує ПАТ «Київенерго» (рис. 1, крива 3) цей потік при фактичній витраті змінюється в діапазоні $0,763 \div 0,735$. При фактичних витраті та температурі теплоносія, що враховують втрати в подавальному трубопроводі $0,724 - 0,7$.

Таким чином, експлуатація при недотриманні проектних умов може призводити до зменшення теплового потоку від 18 % на 12-му поверсі до 21 % – на 1-му.

Для середніх температур опалювального сезону відносне значення проектного теплового потоку збільшується до 5 % на 1-му поверсі в порівнянні з 12-м (рис. 2, б). Зменшення витрати теплоносія до фактичного значення призводить до зменшення теплового потоку на нижніх поверхах, що сягає до 5 % на 1-му поверсі. Зменшення температури подачі теплоносія в стояк відповідно до графіку ПАТ «Київенерго» призводить до зменшення теплового потоку на 12-му поверсі на 10 %, на 1-му поверсі – 13 %. При фактичних витраті та температурі теплоносія, тепловий потік зменшується на 15 % на 12-му поверсі, і майже на 19 % – на 1-му. В розглянутому діапазоні недотримання умов подачі теплоносія зменшення витрати призводить до зменшення теплового потоку до 5 %, а зменшення температури подачі теплоносія – у середньому на 17 %.

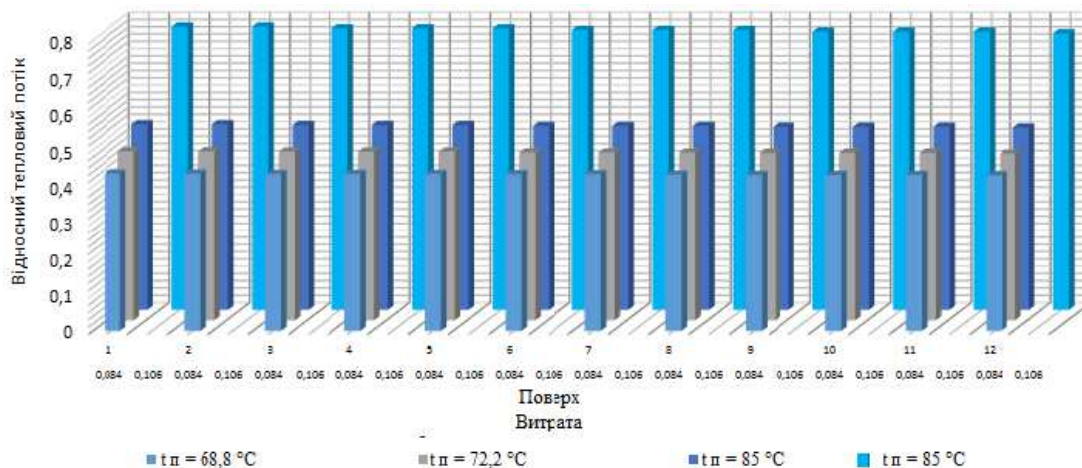


а

Рис. 2. Відносні теплові потоки ОП, розташовані на різних поверхах залежно від витрати і температури подачі теплоносія:

а – при зовнішній температурі повітря -18 °C;

б – при зовнішній температурі повітря 0 °C



б

Рис. 2. Аркуш 2

Були також проведені розрахунки для витрати теплоносія, зменшеної відносно проектної в 1,5 рази (0,05 кг/с). Для прийнятих вище змін температури подачі відхилення теплових потоків ОП при тій же самій тенденції може становити від 25 до 40 % відповідно на верхньому та нижньому поверхах.

Аналогічний аналіз проводився для температур у приміщеннях. Згідно з рівнянням (2) є зв'язок між зміною теплового потоку та температури в приміщенні (7).

$$\frac{Q}{Q_p} = \frac{t_{вн} - t_{зовн}}{t_{вн}^{проект} - t_{р.о.}}, \tag{7}$$

де $t_{вн}^{проект} = 18^\circ\text{C}$ – розрахункова температура внутрішнього повітря в приміщенні.

Таким чином, зменшення теплового потоку призводить до зменшення температури повітря в приміщенні, а саме: при $t_{зовн} = 0^\circ\text{C}$ зменшення теплового потоку на 20 % призводить до зменшення $t_{вн}$ на 4°C , а при $t_{зовн} = -18^\circ\text{C}$ – на 6°C .

Тому загалом характер залежності зміни внутрішньої температури від відхилення опалення відносно проектних умов аналогічний залежності теплового потоку (рис. 2).

Для аналізу тенденції впливу зміни мешканцями існуючих ОП на більш потужні, аналогічний розрахунок проведено для двох варіантів збільшення потужності ОП на 30 %: з 9-го по 4-й поверхи і на всіх поверхах (рис. 3) для фактичних вихідних параметрів подачі води в СО.

На рис. 3, а наведено результати моделювання при $m = 0,084$ кг/с, $t_n = 68,8^\circ\text{C}$, $t_{зовн} = 0^\circ\text{C}$. Збільшення потужності ОП на 30 % з 9-го по 4-й поверхи призводить до збільшення теплового потоку та температури повітря в приміщеннях на 16 та 13 %, відповідно, а для нижніх поверхів (1–3) – це призвело до зменшення теплового потоку ОП і температури повітря в приміщеннях на 2,5 %. При збільшенні потужності ОП на 30 % на всіх поверхах тепловий потік та температура повітря в приміщеннях збільшилися від 16 % на 12-му поверсі до 9 % – на 1-му поверсі.

Аналогічні розрахунки було проведено для зовнішньої температури $t_{зовн} = -18^\circ\text{C}$ (рис. 3, б). Для фактичних умов різниця температур повітря в приміщеннях на першому та 12-му поверхах становить 5°C . Збільшення потужності ОП на 30 % з 9-го по 4-й поверхи призводить до збільшення теплового потоку та температури повітря в приміщеннях на 40 та 35 % відповідно, а для нижніх поверхів (1–3) – це призвело до зменшення теплового потоку ОП і температури повітря в приміщеннях на 11 %. При збільшенні потужності ОП на 30 % на всіх поверхах тепловий потік та температура повітря в

приміщеннях збільшилися від 38,5 % на 12-му поверсі до 26 % – на 1 поверсі. Збільшення потужності ОП на поверхах з 9-го по 4-й в порівнянні із заміною ОП на всіх поверхах давало для поверхів 4-9 ефект більший на 4 %.

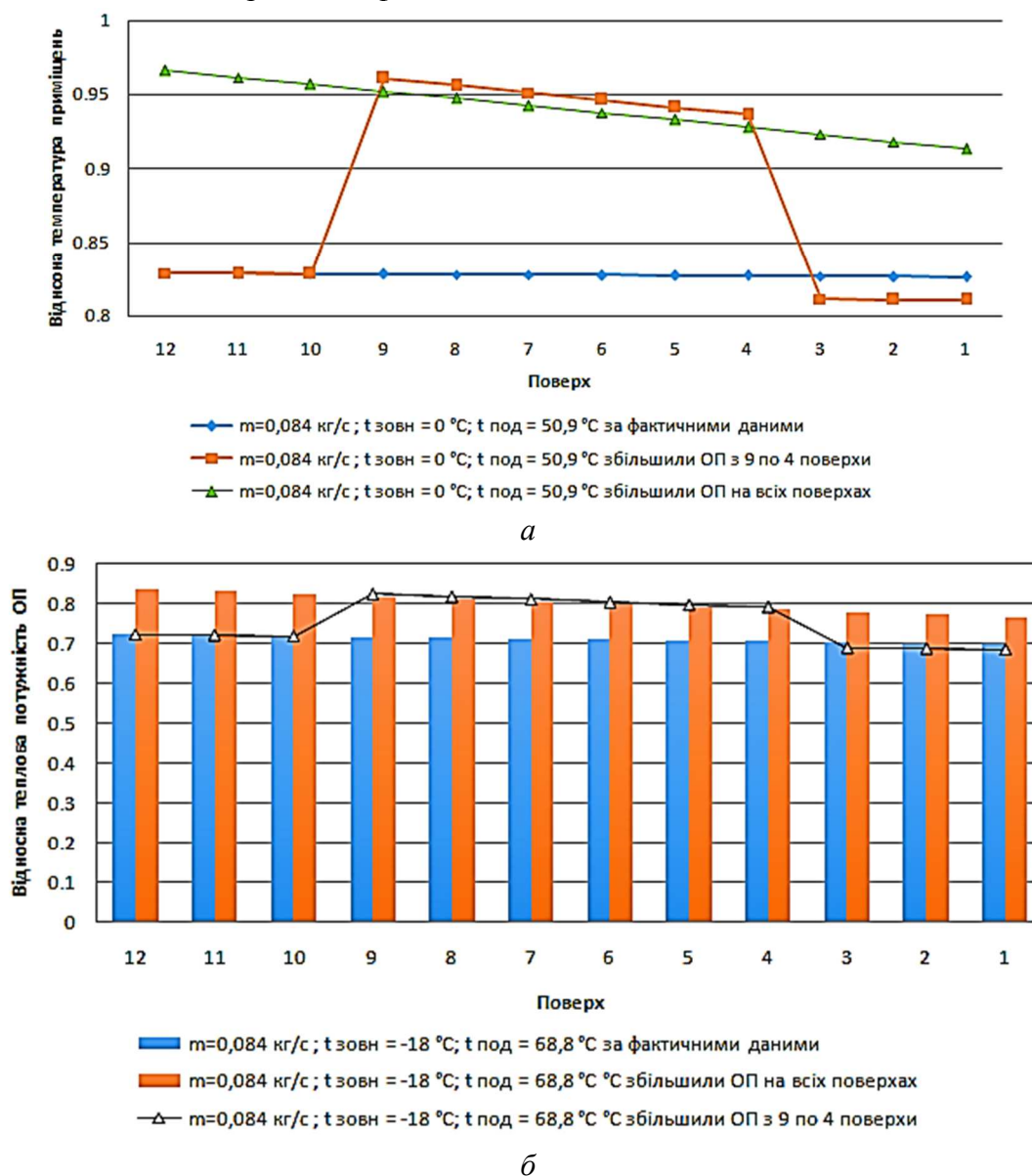


Рис. 3. Відносна температура повітря в приміщенні (а) та тепла потужність ОП (б) при зміні потужності ОП

Висновки відповідно до статті. Для умов централізованого теплопостачання в Україні типовим є недотримання температурного графіка подачі теплоносія, який відповідає проектним вимогам, і забезпечення дотримання умов комфортності мешканцями індивідуально, без урахування системних зв'язків у системі центрального опалення будівлі.

Враховуючи це, в роботі проведено аналіз показників роботи однотрубної проточної системи опалення та дотримання умов комфортності при експлуатації типової багатоквартирної 12-поверхової будівлі.

На основі енергоаудиту будівлі виявлено відхилення фактичного температурного графіка та зменшення витрати теплоносія від проектної майже в 1,2 раза, а також індивідуальні заміни приладів опалення.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Для системного аналізу цих впливів за різних умов експлуатації в програмному середовищі Mathcad розроблено математичну модель для визначення теплового стану приміщень будівлі на прикладі одного стояка.

Визначено відхилення теплового потоку СО та різниці температур між внутрішнім та зовнішнім середовищем від проектних при $t_{зовн} = -18\text{ }^{\circ}\text{C}$ та $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, яке в середньому становить близько 20 та 17 % відповідно.

Збільшення потужності приладів опалення на 30 % на середніх шести поверхах призводить до збільшення теплового потоку на цих поверхах на 15 %, і зменшенню на 2,5 % – на нижніх при $t_{зовн} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для холодного періоду ці відмінності можуть сягати відповідно 30-40 та 11 %.

Збільшення потужності приладів опалення на 30% на всіх поверхах може призвести до забезпечення вищого рівня умов комфортності (у середньому 95 %). Для середніх зовнішніх умов це призводить до різниці температур повітря в приміщеннях на першому та 12-му поверсі на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, а при $t_{зовн} = -18\text{ }^{\circ}\text{C}$ – на $4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для компенсації цих ефектів потрібно збільшувати витрату теплоносія за рахунок центрального регулювання системи опалення.

У подальшому для аналізу впливу точкової індивідуальної модернізації заплановано дослідити додатковий вплив від точкової термосанації огорожень.

Список використаних джерел

1. Теплова ізоляція будівель: ДБН В.2.6–31:2016. [Чинні від 2017–05–01]. Київ: Українбудінформ, 2016. 33 с. (Державні будівельні норми України)
2. Марущак У. Д., Саницький М. А., Гоц В. В., Федунь Ю. Б. Техніко-економічні показники низькоенергетичних будинків. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва*. 2013. № 755. С. 262–267. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPTRB_2013_755_49.
3. Офіційний сайт Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. URL: <http://minregion.gov.ua>.
4. Про енергетичну ефективність будівель: Закон України від 22.06.2017 № 2118-VIII.
5. Про особливості здійснення права власності у багатоквартирних будинках: Закон України від 14.05.2015 № 417-VIII.
6. Про комерційний облік теплової енергії та водопостачання: Закон України від 22.06.2017 № 2119-VIII.
7. Про Фонд енергоефективності: Закон України від 08.06.2017 № 2095-VIII.
8. ДСТУ ISO 50001:2014. Енергозбереження. Системи енергетичного менеджменту. Вимоги та настанова щодо використання (ISO 50001:2011, IDT).
9. ДСТУ ISO 50002:2016 (ISO 50002:2014, IDT). Енергетичні аудити. Вимоги та настанова щодо їх проведення.
10. Офіційний сайт ДАЕЕ (Держенергоефективності). URL: <http://sae.gov.ua>.
11. Боженко М. Ф., Сало В. П. Джерела тепlopостачання та споживачі теплоти: навч. посіб. Київ: ІВЦ «Видавництво «Політехніка»», 2004. 192 с.
12. Офіційний сайт Департаменту житлово-комунальної інфраструктури. URL: <https://dzki.kyivcity.gov.ua>.
13. EN 12831:2003. Heating system in buildings – Method for calculation of the design heatload. CEN. European Committee for Standardization. 2003.
14. ДСТУ Б А.2.2-12:2015. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та гарячому водопостачанні. [Чинний від 2015.01.01]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2016. 205 с.
15. ДБН В.2.6-31:2006. Конструкції будинків та споруд. Теплова ізоляція будівель. [На заміну СНиП II-3-79; чинний від 2007.04.01]. Київ: Мінбуд України, 2006. 64 с.

References

1. Teplova izoliatsiia budivel [Thermal insulation of buildings]. (2016): *DBN V.2.6–31:2016 from 01.05.2017*. Kyiv: Ukrainbudinform [in Ukrainian].

2. Marushchak U. D., Sanytskyi M. A., Hots V. V., Fedun Yu. B. (2013). Tekhniko-ekonomichni pokaznyky nyzkoenerhetychnykh budynkiv [Feasibility and economic indicators of low-energy buildings]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika». Teoriia i praktyka budivnytstva – Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic". The theory and practice of construction*, 755, 262–267. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPTPB_2013_755_49.
3. Ofitsiynyi sait Ministerstva rehionalnoho rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Ukrainy [Official site of the Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine]. Retrieved from <http://minregion.gov.ua>.
4. Pro enerhetychnu efektyvnist budivel [On the energy efficiency of buildings]. № 2118-VIII (on 22.06.2017).
5. Pro osoblyvosti zdiisnennia prava vlasnosti u bahatokvartyrnykh budynkakh [On peculiarities of realization of the property right in multi-apartment buildings]. № 417-VIII (on 14.05.2015).
6. Pro komertsiiynyi oblik teplovoi enerhii ta vodopostachannia [On commercial accounting of thermal energy and water supply]. № 2119-VIII (on 22.06.2017).
7. Pro Fond enerhoefektyvnosti [About the Energy Efficiency Foundation]. № 2095-VIII (on 08.06.2017).
8. Enerhozberezhennia. Systemy enerhetychnoho menedzhmentu. Vymohy ta nastanova shchodo vykorystannia [Energy Saving. Energy management systems. Requirements and usage guidelines]. *DSTU ISO 50001:2014 (ISO 50001:2011, IDT)*.
9. Enerhetychni audyty. Vymohy ta nastanova shchodo yikh provedennia [Energy audits. Requirements and guidance for their conduct]. *DSTU ISO 50002:2016 (ISO 50002:2014, IDT)*.
10. Ofitsiynyi sait DAEE (Derzhenerhoefektyvnosti) [SAEE Official Website (State Energy Efficiency)]. Retrieved from <http://sae.gov.ua>.
11. Bozhenko, M. F., Salo, V. P. (2004). *Dzherela teplopostachannia ta spozhyvachi teploty [Sources of heat supply and consumers of heat]*. Kyiv: IVTs «Vydavnytstvo ‘Politekhnika» [in Ukrainian].
12. Ofitsiynyi sait Departamenta zhytlovo-komunalnoi infrastruktury [Official site of the Department of Housing and Communal Infrastructure]. Retrieved from <https://dzki.kyivcity.gov.ua>.
13. EN 12831:2003. Heating system in buildings – Method for calculation of the design heatload. CEN. European Committee for Standardization. 2003.
14. Energy efficiency of buildings. Method of calculating energy consumption for heating, cooling, ventilation, lighting and hot water supply [Enerhetychna efektyvnist budivel. Metod rozrakhunku enerhospozhyvannia pry opalenni, okholodzhenni, ventyliatsii, osvitlenni ta hariachomu vodopostachanni]. (2016). *DSTU B A.2.2-12:2015 from 01.01.2015*. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy [in Ukrainian].
15. Structures of buildings and structures. Thermal insulation of buildings [Konstruktsii budynkiv ta sporud. Teplova izoliatsiia budivel]. (2006). *DBN V.2.6-31:2006 from 2007.04.01*. Kyiv: Minbud Ukrainy [in Ukrainian].

UDC 697.1

Valerii Deshko, Inna Bilous, Oleksandra Maksymenko

MODERN PROBLEMS OF THE HEATING SYSTEM OF MULTI-APARTMENT BUILDINGS

Urgency of the research. *The current state of multi-apartment residential buildings, built before the end of the 1990s, requires full or partial modernization and a significant increase in energy efficiency. In addition to energy saving measures, which are actively being implemented both for the house as a whole, as well as for individual apartment owners, there is a problem with the distribution of heat between the apartments by the district heating systems.*

Target setting. *For district heating conditions in Ukraine typical non-compliance with the temperature schedule of the supply of heat carrier, which meets the design requirements, and attempts to provide conditions of comfort residents individually, without taking into account the system connections in the central heating of the building. Proceeding from this, in the work the analysis of the performance of one-pipe flow system of heating and compliance with the conditions of comfort during operation of a typical multi-apartment 12-storey building has been carried out.*

Actual scientific researches and issues analysis. *Taking into account that in order to increase the level of energy efficiency of residential buildings, considerable attention is paid to the issues of thermal sensing, the issue of heat distribution in the engineering networks of the building remains insufficiently highlighted and analyzed.*

Uninvestigated parts of general matters defining. *Failure to comply with temperature charts of heating systems in multi-apartment buildings with partial replacement of heating devices.*

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

The research objective. Determination of deviations in the conditions of operation of the heating system of buildings and the creation of a mathematical model of calculation, which allows to determine and analyze the thermal condition of the premises multi-apartment buildings.

The statement of basic materials. The purpose of this work is to analyze the performance of the system of one-pipe flow-through heating system and adherence to the comfort conditions of typical multi-apartment houses.

Conclusions. In the work the analysis of performance of one-pipe flow-through heating system and observance of comfort conditions during operation of a typical multi-apartment building is carried out. For a systematic analysis of these effects under different operating conditions, Mathcad developed a mathematical model for determining the thermal condition of a building's premises on the example of one riser.

Keywords: thermal load; heat carrier flow; apartment buildings; point modernization; comfort conditions; heating system.
Fig.: 5. Table: 3. References: 15.

Дешко Валерій Іванович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри теплотехніки та енергозбереження, КПІ ім. Ігоря Сікорського (вул. Борщагівська, 115, м. Київ, 05056, Україна).

Deshko Valerii – Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department of Heat Engineering and Energy Saving, NTUU “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (115 Borschahivska Str., 05056 Kyiv, Ukraine).

E-mail: te@kpi.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8218-3933>

Scopus Author ID: 6506189670

Білоус Інна Юрївна – асистент кафедри теплотехніки та енергозбереження. КПІ ім. Ігоря Сікорського (вул. Борщагівська, 115, м. Київ, 05056, Україна).

Bilous Inna – assistant of the Department of Heat Engineering and Energy Saving, NTUU “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (115 Borschahivska Str., 05056 Kyiv, Ukraine).

E-mail: biloys_inna@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6640-103X>

Scopus Author ID: 57194104035

ResearcherID: J-7070-2017

Максименко Олександра Едуардівна – аспірант кафедри теплотехніки та енергозбереження КПІ ім. Ігоря Сікорського, (вул. Борщагівська, 115, м. Київ, 05056, Україна).

Maksimenko Aleksandra – PhD student of the Department of Heat Engineering and Energy Saving NTUU “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (115 Borschahivska Str., 05056 Kyiv, Ukraine).

E-mail: aleksalekonceva94@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4099-2772>

УДК 697.1

DOI: 10.25140/2411-5363-2019-1(15)-278-288

Олексій Терещук, Євгеній Сахно, Юлія Щербак, Дарія Зимовець

**ПРОВЕДЕННЯ ТЕПЛОВІЗІЙНОГО МОНІТОРИНГУ
ЕНЕРГООЩАДНОСТІ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД**

Актуальність теми дослідження. Процес побудови сучасних систем моніторингу енергоощадності муніципальних будівель є актуальним питанням сучасної дійсності, що зумовлене зростанням кількості споживачів енергії, її ціною та постійним збільшенням обсягів інформації, що визначають параметри енергоощадності, а також розвитком інформаційних ресурсів і сервісів, які можуть використовуватися в системі енергозбереження.

Постановка проблеми. На сучасному етапі розвитку України постає проблема економії теплових ресурсів, що дозволяє знизити ціну на енергоносії та забезпечити енергетичну незалежність держави. У зв'язку з цим питання експрес-оцінки енергоефективності будівель та споруд набуває першочергового значення. Тому визначення класу енергоефективності, побудова тепловізійних діаграм та створення рекомендацій щодо енергозахисту будівельного об'єкта є проблемою цього дослідження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі були розглянуті останні публікації з цієї теми, які представлено у відкритому доступі, включаючи чинні нормативні документи.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Питання щодо оцінки класу енергоефективності муніципальних об'єктів, зокрема навчального корпусу ЧНТУ, вивчено недостатньо. Від якісного вирішення цього питання залежатиме температура в аудиторіях, що впливатиме на якість роботи викладачів та студентів, а також економію державних коштів на опалювання будівлі в зимовий період.

Постановка завдання. Визначення теплотехнічних показників будівлі, класу енергоефективності та проведення тепловізійного моніторингу будівельної споруди.

Виклад основного матеріалу. Для проведення тепловізійного моніторингу енергоефективності будівлі було визначено геометричні параметри 22 корпусу ЧНТУ, на основі яких проводився розрахунок теплотехнічних показників будівлі з подальшим експериментальним визначенням тепловізійних діаграм та їх обробкою в програмному комплексі.

Висновки відповідно до статті. На основі досліджень виконано моніторинг енергоефективності муніципальної будівлі, визначено комплексні показники енергоефективності та отримано клас енергоефективності будівельної споруди. Виконано експериментальні дослідження енергоефективності будівлі за допомогою тепловізора марки Testo 875v-1i (серійний номер 20441348), з обробкою результатів у програмі IRSoft. Дослідження показали, що основні втрати енергії припадають на вікна та батареї корпусу, що необхідно враховувати при плануванні заходів з енергозахисту.

Ключові слова: моніторинг; енергоощадність; тепловізор; тепловізійна зйомка.

Рис.: 3. Табл.: 7. Бібл.: 8.

Актуальність теми дослідження. Проблема збору та обробки поточної інформації про стан енергоощадності будівель і розробка рішень щодо зниження енерговитрат є доволі трудомісткою задачею і часто не під силу людському інтелекту. Теж саме стосується і команди енергоощадного проекту та розробників інформаційно-вимірювальної системи (ІВС), оскільки виникає необхідність здійснення взаємодії між елементами системи. Чим детальніше розробляється модель, тим складніше виконувати навігацію по ній та підтримувати цілісність її даних, крім того, при прийнятті управлінських рішень неможливо гарантувати відсутність помилок.

При проектуванні систем моніторингу енергоощадності будівель треба зазначити, що раціональний розподіл функцій між людиною (експерт, що знімає показники тепловізора) та системою прийняття управлінських рішень залежить від організації їх взаємодії при вирішенні поставленого завдання. Ефективність автоматизованого управління даною системою може зменшитися через складність ЕОМ оперувати значною експериментальною інформацією та невизначеними параметрами. Зважаючи на вищевикладене, доцільно проводити виміри параметрів енергоефективності та застосувати ІС для обробки отриманої інформації.

Постановка проблеми. На сучасному етапі розвитку України постає проблема економії теплових ресурсів, що дозволяє знизити ціну на енергоносії та забезпечити енергетичну незалежність держави. У зв'язку з цим питання експрес-оцінки енергоефективності будівель та споруд набуває першочергового значення. Тому визначення класу енергоефективності, побудова тепловізійних діаграм та створення рекомендацій щодо енергозахисту будівельного об'єкта є проблемою цього дослідження.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В статті проаналізовано державні стандарти, державні будівельні норми та інший керівний матеріал [1-4], в якому висвітлено нормативні положення щодо енергозахисту будівель та споруд. У [5] визначено роль моніторингу в будівництві, головною метою якого є отримання інформації про статистичні й динамічні характеристики об'єктів будівництва, технологічні процеси і засоби будівельного виробництва з наступною їх обробкою для отримання варіантів управлінських рішень. Тепловізійну зйомку, як сучасний метод контролю теплових втрат будівлі, що дозволяє оцінити стан теплоізоляційних властивостей огорожувальних конструкцій та отримати достовірну інформацію в доступній, візуально зрозумілій формі розглянуто в джерелі [6]. Завдання, яке вирішується авторами доповіді [7], передбачає комплексний підхід у межах єдиного інформаційного простору та поєднує в собі процеси тепловізійної діагностики будівель та споруд, оцінку енергоефективності з врахуванням державних та європейських стандартів і процесів прийняття управлінських рішень із реконструкції об'єкта. Вибір інтегрованого середовища та створення прототипу інформаційного забезпечення тепловізійного моніторингу розглянуто в [8].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Процеси організації та проведення моніторингу малоповерхових будівель треба розглядати як єдиний інформаційний автоматизований комплекс, який дає можливість зменшення енерговитрат та економії фінансових ресурсів на опалення. При цьому новизна наведених досліджень полягає в проведенні моніторингу будівель з метою створення інформаційної системи, яка базується на принципах нечіткого моделювання, і яку рекомендується використовувати в тому випадку, коли об'єкт управління та його зовнішнє середовище являє собою комплекс складних процесів і факторів, що істотно впливають один на одного. Ключовим засобом аналізу результатів тепловізійного моніторингу будівель та споруд є визначення впливу різноманітних факторів на об'єкт управління для переведення системи з початкового стану в кінцевий.

Постановка завдання (цілей статті). Завданням цієї статті є визначення теплотехнічних показників будівлі, класу енергоефективності та проведення тепловізійного моніторингу будівельної споруди. Вихідними даними для виконання завдання є: план триповерхового навчального корпусу № 22 ЧНТУ, що розташований за адресою: м. Чернігів, вул. Белова, 4; температурні дані; тепловізор марки Testo 875v-1i, серійний номер 20441348; програмне забезпечення для термографії IRSoft4.3.

Виклад основного матеріалу. Загальновідомо, що в процесі моніторингу енергоощадності будівель активно використовуються ІС візуального спостереження (суб'єктивні оцінки), фотографії, аудіозапис (суб'єктивний коментар оператора або об'єктивне відображення звукової картини будівництва), відеозйомка, комп'ютерний і екранний моніторинг. Канал передачі даних моніторингу в будівництві може бути одноразовим або багаторазовим (повторюваним або циклічним). Вимірювані й передані дані можуть бути представлені в аналоговій або цифровій формі. Ланцюг передачі даних може бути єдиним (провідник, оптоволоконні лінії та ін.) або являти собою сукупність модулів, які можуть вимагати перетворення переданого сигналу (перекодування, посилення сигналу і ін.).

Вимірювальна технологія реалізує проведення процесу вимірювань на базі використання ІС та отримання результату і похибки вимірювань. На рис. 1 наведено послідовність перетворення інформації при проведенні моніторингу енергоефективності будівель та споруд.



Рис. 1. Послідовність перетворення інформації про об'єкт дослідження

Основні завдання при реалізації технології моніторингу можна сформулювати так [6]:

1. Забезпечення нормованих метрологічних характеристик функціонування ІС як засобу вимірювання.
2. Перетворення вихідної інформації об'єкта вимірювань за допомогою первинних вимірювальних перетворювачів у вимірювальну інформацію (вимірювальні сигнали).
3. Перетворення вимірювальних сигналів у дані вимірювань відповідними пристроями порівняння для наступної передачі, накопичення, зберігання й обробки.
4. Обробка даних вимірювань пристроями ІВС та визначення результатів.
5. Використання отриманих результатів вимірювань для подальшого вирішення завдань контролю, діагностики, розпізнавання, ідентифікації, управління та ін.
6. Захист інформації для досліджень на всіх етапах її трансформації, передачі й обробки апаратно-програмними засобами ІС.

При обстеженні будівельного комплексу важливим завданням є проведення масового й оперативного обстеження фактичного теплотехнічного стану будівель, фактичного розподілу температур (температурних полів) по поверхні зовнішніх огорожувальних конструкцій будівель і споруд. Подібні обстеження покликані допомогти:

- виявити найбільш несприятливі місця, через які спостерігаються підвищені тепловтрати;
- визначити фактичний опір теплопередачі як усього будинку загалом, так і окремого розглянутого фрагмента (вузла, стику).

На початковому етапі моніторингу є потреба у визначенні геометричних характеристик будівельного об'єкта (навчальний корпус № 22) та тепловізійній зйомці внутрішніх приміщень і фасадів корпусу з метою виявлення найбільш несприятливих місць, через які спостерігаються підвищені тепловтрати. Загальну інформацію про будівлю та розрахункові умови її функціонування наведено в табл. 1, 2, 3.

Таблиця 1

Загальна інформація про навчальний корпус № 22 ЧНТУ

Дата заповнення (число, місяць, рік)	17.01.2019
Адреса будівлі	м. Чернігів, вул. Белова, 4
Розробник проекту	Сахно Є. Ю.
Призначення будівлі, серія	нежитлова
Поверховість	3-поверхова
Конструктивне рішення	Панельні блоки, облицьовані керамічною плиткою; дерев'яний дах покритий руберойдом, з захисним шаром керамзиту. Вікна металопластикові – аудиторії 215, 216, 217, інші – дерев'яні

Таблиця 2

Розрахункові умови функціонування навчального корпусу № 22 ЧНТУ

№ з/п	Найменування розрахункових параметрів	Позначення символу	Одиниці виміру	Розрахункове значення
1.	Розрахункова температура зовнішнього повітря для проектування теплозахисту	t_z	К	-23
2.	Середня температура зовнішнього повітря за опалювальний період	$t_{оп}$	К	-1,4
3.	Тривалість опалювального періоду	$z_{оп}$	доб/год	185
4.	Градусо-доба опалювального періоду	ГДОП	К·доб/год	3959
5.	Розрахункова температура внутрішнього повітря для проектування теплозахисту	t_v	К	20

Геометричні показники будівлі

№ з/п	Показник	Позначення і одиниці вимірювання	Розрахункове (проектне) значення
1.	Сума площ поверхів будинку	$A_{оп}, м^2$	2619,90
2.	Площа кабінетів	$A_k, м^2$	1524,50
3.	Опалювальний об'єм	$V_{оп}, м^3$	9668,77
4.	Коефіцієнт зашкленних фасаду будівлі	f	0,22
5.	Показник компактності будівлі	$K_{комп}, м^{-1}$	0,52
6.	Загальна площа зовнішніх огорожувальних конструкцій будівлі	$A_3^{сум}, м^2$	5066,32
7.	в тому числі :		
	фасадів	$A_{фас}, м^2$	2222,34
	вікон та балконних дверей	$A_{ок}, м^2$	641,25
	вхідних дверей	$A_{дв}, м^2$	6,25
	покриттів (суміщених)	$A_{покp}, м^2$	1098,24
	горищ	$A_{гор}, м^2$	1098,24
8.	Вікон по сторонах світу:		
	Північ	$A_{півн}, м^2$	116
	Захід	$A_з, м^2$	142,37
	Схід	$A_c, м^2$	182,88
	Південь	$A_{півд}, м^2$	200

При проведенні розрахунку площами вхідних дверей ($A_{дв}$) у загальному розрахунку можна знехтувати, оскільки їх площа становить 0,055 % від загальної площі огорожувальних конструкцій.

Тоді коефіцієнт скління фасаду будівлі буде:

$$f = \frac{A_{вікон}}{A_{фас} + A_{вікон}} = 0,22. \quad (1)$$

Показник компактності будівлі:

$$K_{комп} = \frac{A_3^{сум}}{V_{оп}} = 0,52. \quad (2)$$

На основі даних ДБН [2] обираємо теплотехнічні показники будівлі даного типу та заносимо їх до табл. 4. Нормовані значення R_{req} приведенного опору теплопередачі огорожувальних конструкцій розраховуються за формулою:

$$R_s = \alpha \cdot D_d + b, \quad (3)$$

де для зовнішньої стіни: $R_{req} = 2,79 \text{ м}^2\text{К/Вт}$; для скління: $R_{req} = 0,45 \text{ м}^2 \text{ К/Вт}$; для перекриттів: $R_{req} = 3,68 \text{ м}^2 \text{ К/Вт}$; для горищ: $R_{req} = 4,18 \text{ м}^2 \text{ К/Вт}$.

У табл. 5 наведено допоміжні показники для проведення подальших розрахунків. Загальний коефіцієнт теплопередачі будівлі $Вт/(м^2 \text{ К})$ визначається за формулою:

$$K_{заг} = \frac{1}{A_3^{сум}} \cdot \sum_i (n_{t,i} \cdot \frac{A_{ф,i}}{R_{o,i}^{np}}) = 0,483 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \quad (4)$$

$A_{ф,i}$ – площа відповідного фрагмента теплозахисної оболонки; $R_{o,i}^{np}$ – розрахунковий опір теплопередачі i -того фрагмента.

Теплотехнічні показники

№ з/п	Показник	Позначення та одиниці вимірювання	Нормоване значення	Розрахункове(проектне)значення
1.	Приведений опір тепловіддачі зовнішніх огорож, в тому числі:	R_0^{np} , м ² · К/Вт		
	стін	$R_{0,ст}^{np}$	2,79	3,23
	вікон	$R_{0,вік}^{np}$	0,45	0,51
	вхідних дверей	$R_{0,вх.дв}^{np}$	-	-
2.	Перекриттів (з'єднаних)	$R_{0,перек}^{np}$	3,68	4,18
	горищ	$R_{0,гор}^{np}$	4,18	4,59

Таблиця 5

Допоміжні показники

№ з/п	Показники	Позначення та одиниці виміру	Розрахункове проектне значення показника
1.	Загальний коефіцієнт теплопередачі будівлі	$K_{заг}$, Вт/(м ² · К)	0,483
2.	Середня кратність повітряного обміну будівлі за опалювальний період при питомій нормі повітряного обміну	n_n , ч ⁻¹	0,617
3.	Питома побутові тепловиділення в будівлі	$q_{побут}$, Вт/ м ²	17

Середня кратність повітряного обміну будівлі за опалювальний період n_n , ч⁻¹ розраховується за формулою:

$$n_n = \frac{\left[\frac{L_{вент} \cdot n_{вент}}{168} + \frac{G_{інф} \cdot n_{інф}}{168 \cdot 1,3} \right]}{\beta_V \cdot V_{он}} = 0,617 \text{ (ч}^{-1}\text{)}, \quad (4)$$

де $L_{вент}$ – кількість проточного повітря, $n_{вент}$ – кількість годин роботи вентиляції, $G_{інф}$ – кількість фільтруючого повітря, $n_{інф}$ – кількість годин інфільтрації протягом тижня.

На основі даних ДБН проводимо розрахунок питомих показників енергоефективності будівель. Питома теплозахисна характеристика будівлі розраховується за формулою:

$$k_{заг} = K_{ком} \cdot K_{заг} = 0,251 \text{ Вт/(м}^3 \cdot \text{К)}. \quad (5)$$

Питома вентиляційна характеристика будівлі розраховується за формулою:

$$k_{вент} = 0,28 c_n \beta_V \rho_e^{вент} (1 - k_{эф}) = 0,18 \text{ Вт/(м}^3 \cdot \text{К)}, \quad (6)$$

де c_n – питома ємність повітря, n_n – середня кратність повітря, яке надходить до будівлі, β_V – коефіцієнт зниження об'єму повітря, $\rho_e^{вент}$ – середня щільність повітряного обміну будівлі.

Питома характеристика побутових тепловиділень будівлі розраховується за формулою:

$$k_{побут} = \frac{q_{побут} \cdot A_k}{V_{он} \cdot (t_B + t_{он})} = 0,13 \text{ Вт/(м}^3 \cdot \text{К)}. \quad (7)$$

Питома характеристика теплонадходжень у будівлю від сонячної радіації розраховується за формулою:

$$k_{рад} = \frac{11,6 \cdot Q_{рад}^{zod}}{V_{он} \cdot ГДОП} = 0,076 \quad Вт/(м^3 \cdot К), \quad (8)$$

де $Q_{рад}^{zod}$ – теплонадходження через вікна від сонячної радіації за опалювальний період, МДж/год, для чотирьох фасадів будівлі.

Коефіцієнти опалення та комплексні показники наведено в табл. 6 та 7.

Для визначення класу енергоефективності розрахуємо питому витрату теплової енергії на опалення й вентиляцію будівлі за опалювальний період q , кВт·ч/(м³·год) за формулою:

$$q = 0,024 \cdot ГДОП \cdot q_{он}^p = 30,50 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/(\text{м}^3 \cdot \text{год}), \quad (9)$$

де $q_{он}^p$ – розрахункова питома характеристика витрат теплової енергії на опалення і вентиляцію будівель за опалювальний період, визначається за формулою:

$$q_{он}^p = [k_{заг} + k_{вент} - (k_{побут} + k_{рад}) \cdot \nu \zeta](1 - \xi)\beta_h = 0,321. \quad (10)$$

Таблиця 6

Коефіцієнти опалення

№ з/п	Показники	Позначення	Нормативне значення показника
1.	Коефіцієнт ефективності авторегулювання опалення	ζ	0,7
2.	Коефіцієнт, що враховує зниження теплоспоживання нежитлових будівель при наявності кабінетного обліку енергії на опалення	ξ	0,1
3.	Коефіцієнт ефективності рекуператора	k_{ef}	0,4
4.	Коефіцієнт, що враховує зниження використання теплонадходжень у період перевищення їх над тепловтратами	ν	0,8
5.	Коефіцієнт обліку додаткових систем опалення	β_h	1,13

Витрати теплової енергії на опалення й вентиляцію будівлі за опалювальний період $Q_{он}^{год}$, кВт·ч/год, необхідно визначати за формулою:

$$Q_{он}^{год} = 0,024 \cdot ГДОП \cdot V_{он} \cdot q_{он}^p = 294898,8 \quad \text{кВт} \cdot \text{ч}/\text{год}. \quad (11)$$

І тоді клас енергозбереження визначається за формулою:

$$(q_{он}^p - q_{он}^{mp})/q_{он}^p \cdot 100\% = -16\%. \quad (12)$$

Згідно з табл. 7 клас енергоефективності В.

Сучасні технології дозволяють визначити місця понаднормових тепловтрат будівлі, даючи можливість провести правильну модернізацію і вийти на розумний рівень енергоспоживання. До таких технологій відноситься тепловізійна зйомка, яка являє собою сучасний метод контролю теплових втрат будівлі, який дозволяє оцінити стан теплоізоляційних властивостей огорожувальних конструкцій та отримати достовірну інформацію в доступній та візуально зрозумілій формі. Цей інструмент діагностики будівель останні кілька років дуже затребуваний в ЄС та поступово набуває популярності в Україні [8].

Таблиця 7

Комплексні показники

№ з/п	Показники	Позначення показника та одиниці вимірювання	Значення показника
1	2	3	4
1.	Питома витрата теплової енергії на опалення і вентиляцію будівлі за опалювальний період	q , кВт·ч/(м ³ ·год)	30,5
2.	Розрахункова питома характеристика витрати теплової енергії на опалення і вентиляцію за опалювальний період	$q_{он}^p$, Вт/(м ³ ·К)	0,321

1	2	3	4
3.	Витрати теплової енергії на опалення і вентиляцію будівлі за опалювальний період	$Q_{\text{оп}}^{\text{год}}$, кВт·ч/год	294898,8
4.	Нормова (базова) питома характеристика витрат теплової енергії на опалення і вентиляцію будівлі	$q_{\text{оп}}^{\text{тр}}$, Вт/(м ³ ·К)	0,16
5.	Клас енергозбереження	В	
6.	Чи відповідає проект будівлі нормативним вимогам теплозахисту	Так	

Основними етапами тепловізійного обстеження є:

1. Внутрішня зйомка – найбільш важливий етап, тому що тільки при внутрішній зйомці виявляється понад 90 % дефектів пов'язаних із порушенням технології спорудження будинку, зйомка проводиться не вибірково, а кожної стіни (крім внутрішніх перегородок).

2. Зовнішня зйомка потрібна здебільшого для виявлення дефектів фасадів і в крайньому випадку дефектів утепленої покрівлі.

3. Обробка результатів, полягає в комп'ютерній обробці отриманих термограм. Після обробки термограм на них чітко видно місця дефектів, їхні якісні та кількісні характеристики.

4. Створення звіту, де фахівець обробляє класифікацію дефектів, визначає причину їх виникнення, а також дає рекомендації щодо їх усунення [7].

Об'єктом дослідження в цій науковій роботі було обрано триповерховий корпус № 22 Чернігівського національного технологічного університету, що розташований на вулиці Белова, 4 м. Чернігова. У досліджах брали участь представники підприємства «Теплопар+» та студенти 3-го курсу гр. ВР-151, спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія», спеціалізація «Гідротехніка (водні ресурси)» навчально-наукового інституту будівництва. Було проведено 120 замірів втрат тепла як із зовнішнього боку будівлі, так і всередині приміщення за допомогою тепловізора Testo 875-1i, серійний номер 60470428.

Тепловізійне обстеження дозволяє:

- проконтролювати роботу теплоізоляції будинку;
- виявити місця появи конденсату на внутрішніх поверхнях приміщення;
- розрахувати необхідну кількість і підібрати тип утеплювача;
- виявити засмічення опалювальних систем;
- виявити місця протікання дахів і труб;
- визначити наявність, розмір і джерело тріщин у стінах;
- визначити неякісну установку віконних і дверних блоків;
- проконтролювати герметичність віконних склопакетів;
- знайти причину підвищеної вологості або сухості клімату всередині будівлі;
- відстежити стан електропроводки для усунення слабких контактів, які можуть викликати пожежу при нагріванні від навантажень;
- знайти місця проживання гризунів та інших небажаних співмешканців.

Умови проведення тепловізійної зйомки такі :

- різниця внутрішньої температури приміщення й температури навколишнього середовища має становити не менше за 15 °С (тобто якщо у будинку 20 °С, то на вулиці повинно бути не більше ніж 5 °С);
- вимірювання проводяться рано-вранці чи пізно ввечері (через 2–3 години після заходу сонця);
- погода повинна бути сухою, без туману чи опадів, допустима швидкість вітру – до 2 м/с;

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

- у внутрішніх приміщеннях необхідно підтримувати рівномірну температуру (усередині будівлі двері мають бути відчинені, а всі вікна – зачинені);
- рекомендується підтримувати навантаження системи опалення без змін, починаючи за 4–5 годин до обстеження та під час нього [5].

На рис. 2 наведено результати тепловізійного моніторингу 22 корпусу ЧНТУ, представлено основні елементи будівлі, що мають надвисокі витрати теплової енергії.

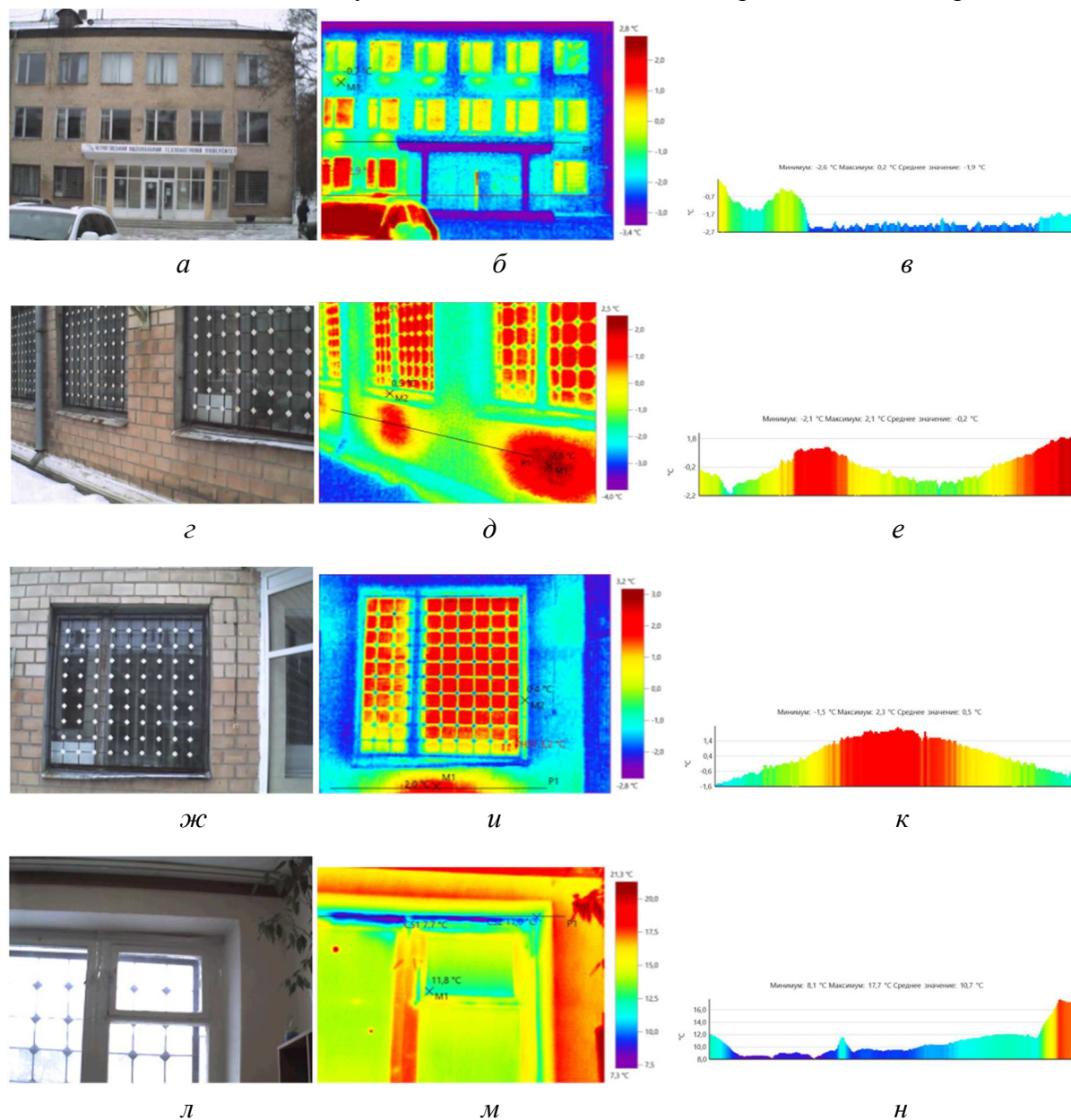


Рис. 2. Результати тепловізійної зйомки будівлі:

а – загальний вид корпусу № 22 ЧНТУ; б – втрати тепла в огорожувальних конструкціях; в – зміна температури уздовж лінії профілю; г – фасад корпусу № 22 ЧНТУ; д – втрати тепла від батарей; е – зміна температури від батареї по лінії профілю; ж – вікно фасаду корпусу № 22 ЧНТУ; и – втрати тепла від вікна, та від віконної рами; к – зміна температури вікна уздовж лінії профілю; л – вікно всередині корпусу; м – вихід холоду через вікно та віконну раму; н – зміна температури вікна уздовж лінії профілю

Проведені тепловізійні випробування дадуть значний економічний ефект і дозволяють заощадити витрати коштів і матеріалів на ремонт. Проведення тепловізійних обстежень має широкий суспільний резонанс, привертає увагу мешканців мікрорайонів і громадськості, привчає їх до розуміння проблеми енергозабезпечення, економії ресурсів,

оцінку об'єктивності вибору рішення адміністрацією міста, енергетиків, ЖКГ та інших служб. Таким чином, проведене тепловізійне обстеження будівель і споруд дозволило виявити такі елементи, які й є основними при втраті теплової енергії: недостатній рівень утеплення конструкції; наявність дефектів цегляної кладки; можливе порушення в місцях з'єднання елементів збірних конструкцій; недоліки в перекриттях будівель; витоку тепла через заклені ділянки та віконні прорізи конструкції; місця скупчення зайвої вологи.

Програмне забезпечення для термографії IRTSoft дозволяє з легкістю обробляти інфрачервоні зображення і проводити їх аналіз на ПК (рис. 3). Функції всебічного аналізу призначені для професійної обробки термограм. Так, наприклад можливе подальше коректування коефіцієнтів випромінювання різних матеріалів для певних ділянок зображення до окремих пікселів. Щоб візуалізувати критичні значення температури на зображенні, аналітичне ПЗ дозволяє виділяти значення температури, але вони не попадають у заданий діапазон. Крім того, можна задавати необмежену кількість точок вимірювання, відображати гарячі або холодні точки і робити голосові коментарі до термограми [8].

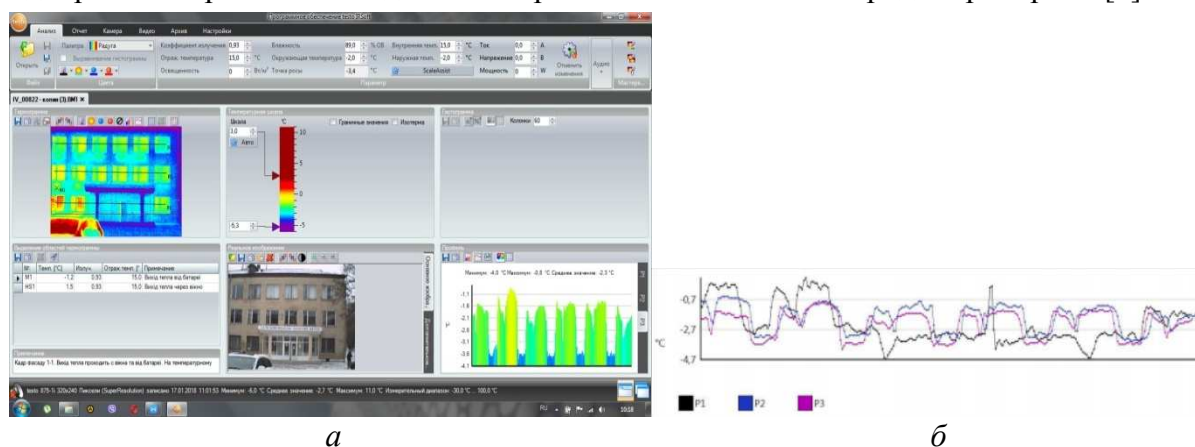


Рис. 3. Результати отриманих даних у програмі обробки IRTSoft:

- а) результати тепловізійної зйомки в програмі IRTSoft;
б) зміна температури будівлі вздовж лінії профілю

Після обробки отриманих даних за допомогою програмного забезпечення «TestoSoftware» було виявлено основні «точки холоду» в будівлі (рис. 2, 3), які показали, що основні втрати тепла припадають на стики панелей перекриття з фасадами будівлі, вікна та опалювальні батареї, які світяться яскраво червоним світлом на фасаді споруди.

Висновки відповідно до статті. У результаті проведених досліджень отримані характеристики будівлі, які дозволяють оцінити її енергоефективність. При цьому, коли будівля має високий клас енергозбереження, це дозволяє виділяти на неї менше теплове навантаження, і, як наслідок, зменшуються витрати на опалення. Встановлено, що процес моніторингу передбачає застосування значної кількості різномірних параметрів, що є важливою проблемою при розробленні інтегрованої інформаційної системи зі створення єдиного інформаційного автоматизованого простору з діагностики, аналізу енергоефективності та прийняття рішень щодо реалізації енергоощадного проекту з реконструкції. Проведено експериментальні дослідження енергоефективності будівлі за допомогою тепловізора марки Testo 875v-1i, серійний номер 20441348, з обробкою результатів у програмі IRTSoft. Дослідження показали, що основні втрати енергії припадають на вікна та батареї корпусу, що необхідно враховувати при плануванні заходів з енергозахисту.

Список використаних джерел

1. ДБН В.2.6-31:2006. Конструкції будинків і споруд. Теплова ізоляція будівель. [Чинний від 2006-09-09]. Київ: Мінбуд України, 2006. 65 с.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

2. ДСТУ 2155-93. Енергозбереження. Методи визначення економічної ефективності заходів з енергозбереження. [Чинний від 01.01.95]. Київ: Держстандарт України, 1994. 18 с.
3. ДСТУ Б.В.2.7-38-95. Матеріали і вироби будівельні теплоізоляційні. Методи випробувань. [Чинний від 03.04.96]. Київ: Держкоммістобудування України, 1996.
4. Порядок ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2013. 141 с.
5. Маргасов Д. В., Сахно Є. Ю. Вибір інтегрованого середовища та створення прототипу інформаційного забезпечення тепловізійного моніторингу. *Технологический аудит и резервы производства*. 2015. № 5/2 (25). С. 32–40.
6. Терещук О. І., Сахно Є. Ю., Маргасов Д. В., Корзаченко М. М. Моніторинг енергоефективності малоповерхових будівель: монографія. Чернігів: ЧНТУ, 2018. 356 с.
7. Терещук О. І., Сахно Є. Ю., Буренін О. І. Проведення тепловізійного моніторингу малоповерхових будівель та споруд. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції 10-12 травня 2018 р.* Чернігів: ЧНТУ, 2018. Т. 2. С. 94–95.
8. Федорцов С. О. Тепловізійний моніторинг малоповерхових будівель м. Чернігова. *Новітні технології у науковій діяльності і навчальному процесі: Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених і студентів (м. Чернігів, 11-12 квітня 2018 року): тези доповідей.* Чернігів: ЧНТУ, 2018. С. 226–228.

References

1. Konstruktsii budynkiv i sporud. Teplova izoliatsiia budivel [Structures of buildings and structures. Thermal insulation of buildings]. *DBN V.2.6-31:2006 from 09.09.2006* [in Ukrainian].
2. Energy Saving. Methods of determining the economic efficiency of energy saving measures [Enerhozberezhennia. Metody vyznachennia ekonomichnoi efektyvnosti zakhodiv z enerhozberezhennia]. *DSTU 2155-93 from 01.01.95* [in Ukrainian].
3. Materials and products for building, thermo-insulating. Test methods [Materialy i vyroby budivelni teploizoliatsiini. Metody vyprobuvan]. *DSTU B.V.2.7-38-95 from 03.04.96* [in Ukrainian].
4. Opalennia, ventyliatsiia ta kondytsionuvannia. Poriadok DBN V.2.5-67:2013 [Order of DBN V.2.5-67: 2013. Heating, ventilation and air conditioning]. (2013) [in Ukrainian].
5. Marhasov, D. V., Sakhno, Ye. Yu. (2015). Vybir intehrovanoho seredovyshcha ta stvorennia prototypu informatsiinoho zabezpechennia teploviziinoho monitorynhu [The choice of an integrated environment and the creation of a prototype of information provision for thermal monitoring]. *Tekhnologicheskyyi audit i rezervy proizvodstva – Technological audit and production reserves, 5/2 (25), 32-40* [in Ukrainian].
6. Tereshchuk, O. I., Sakhno, Ye. Yu., Marhasov, D. V., Korzachenko, M. M. (2018). *Monitorynh enerhoefektyvnosti malopoverkhovykh budivel [Monitoring of energy efficiency of low-rise buildings]*. Chernihiv: ChNTU [in Ukrainian].
7. Tereshchuk, O. I., Sakhno, Ye. Yu., Burenin, O. I. (2018). Provedennia teploviziinoho monitorynhu malopoverkhovykh budivel ta sporud [Conducting thermovision monitoring of low-rise buildings and structures]. Proceeding from *VIII International Scientific and Practical Conference Kompleksne zabezpechennia yakosti tekhnolohichnykh protsesiv ta system – Comprehensive assurance of the quality of technological processes and systems* (May 10-12, 2018) (pp. 94–95). Chernihiv: ChNTU [in Ukrainian].
8. Fedortsov, S. O. (2018). Teploviziinyi monitorynh malopoverkhovykh budivel m. Chernihova [Thermal imaging monitoring of low-rise buildings in Chernihiv]. Proceeding from *All-Ukrainian scientific and practical conference of young scientists and students Novitni tekhnolohii u naukovii diialnosti i navchalnomu protsesi – Newest technologies in scientific activity and educational process* (Chernihiv, April 11-12, 2018). Chernihiv: ChNTU [in Ukrainian].

UDC 697.1

Oleksii Tereshchuk, Yevgeny Sakhno, Yuliya Shcherbak, Dariia Zymovets

**CONDUCTING THERMAL IMPORTANT MONITORING OF BUILDINGS
AND CONSTRUCTIONS ENERGY SAVING**

Urgency of the research. *The process of building modern systems for monitoring energy saving of municipal buildings is a pressing issue of modern reality, due to the growing number of energy consumers, its price, the constant increase in the*

amount of information defining the parameters of energy saving, as well as the development of information resources and services that can be used in the energy saving system.

Target setting. At the present stage of development of Ukraine, the problem of saving thermal resources arises, which makes it possible to reduce the price of energy carriers and ensure the energy independence of the state. In this regard, the issue of rapid assessment of energy efficiency of buildings and structures is of paramount importance. Therefore, the definition of energy efficiency class, the construction of thermal imaging diagrams and the creation of recommendations for the energy protection of a construction object is a problem of this scientific study.

Actual scientific researches and issues analysis. Recent publications on this subject, which are presented in open access, including existing normative documents, were reviewed.

Uninvestigated parts of general matters defining. The issue of assessing the energy efficiency class of municipal facilities, in particular the educational building of the Chernihiv National Technological University, has not been studied enough. The quality of this issue will depend on the temperature in the classroom, which will affect the quality of teachers and students, as well as the savings of public funds for heating the building in the winter.

The research objective. Determination of thermal performance of the building, energy efficiency class and conducting thermal imaging monitoring of the building structure.

The statement of basic materials. To conduct thermal imaging monitoring of the building's energy efficiency, materials were collected on the parameters of the 23 corps of the Chernihiv National Technological University, on the basis of which the thermal performance of the building was calculated, followed by experimental determination of the thermal imaging diagrams and their processing in the software package.

Conclusions. Based on the research, the energy efficiency of the municipal building was monitored, the complex energy efficiency indicators were determined, and the energy efficiency class of the building was obtained. Experimental studies of the energy efficiency of the building were carried out using a thermal imager of the Testo brand 875v-1i (serial number 20441348), with the results processed in the IRSoft program. Studies have shown that the main energy losses occur in windows and case batteries, which must be considered when planning energy protection measures.

Keywords: monitoring; energy saving; thermal imager; thermal imaging.

Fig.: 3. Table: 7. References: 8.

Терещук Олексій Іванович – кандидат технічних наук, доцент, директор навчально-наукового інституту будівництва, професор кафедри геодезії, картографії та землеустрою, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Белова, 4, м. Чернігів, 14000, Україна).

Tereshchuk Oleksii – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Director of the Educational and Scientific Institute of Construction, Professor of the Department of Geodesy, Cartography and Land Management, Chernihiv National Technological University (4 Belova Str., 14000 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: olexter1957@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6433-9351>

ResearcherID: H-4540-2016

Сахно Євгеній Юрійович – доктор технічних наук, професор кафедри геодезії, картографії та землеустрою, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Sakhno Evgeniy – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Geodesy, Cartography and Land Management, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: evsakhno@ukr.net

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9789-7242>

ResearcherID: M-3987-2016

Щербак Юлія Володимирівна – магістр, викладач кафедри геодезії, картографії та землеустрою, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Shcherbak Yuliya – Master, lecturer of the Department of Geodesy, Cartography and Land Management, Chernihiv National University of Technology. (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: Shch.Yu15@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3439-3792>

ResearcherID: H-4199-2016

Зимовець Дарія Валентинівна – студент кафедри геодезії, картографії та землеустрою, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Zymovets Dariia – student of the Department of Geodesy, Cartography and Land Management, Chernihiv National University of Technology. (95 Shevchenko Str., 14034 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: darya.zimovec@gmail.com

**ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАЧІ РУКОПИСІВ
НАУКОВИХ СТАТЕЙ ДО НАУКОВОГО ЖУРНАЛУ
«ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ»**

Шановні дописувачі!

Для подання статті необхідно спочатку надіслати на електронну адресу tst.technical.sj@gmail.com Вашу статтю, рецензію та довідку про автора (ів) для попереднього розгляду редакційною колегією журналу «Технічні науки та технології».

Після отримання позитивного відгуку прохання сплатити вартість публікації і відправити весь пакет документів.

Для публікації статті у журналі «Технічні науки та технології» необхідно в обов'язковому порядку подати:

- електронний варіант статті, оформленої за зразком;
- рецензію на статтю за підписом доктора наук;
- довідку про авторів;
- квитанцію (скановану) про сплату вартості публікації наукової статті.

Опублікування наукових статей у журналі «Технічні науки та технології» є платним. Вартість публікації 1 сторінки наукової статті становить **65 грн** (прохання обов'язково уточнювати вартість публікації). Оплата підтверджується квитанцією.

**УМОВИ ПУБЛІКАЦІЇ, ВИМОГИ ЩОДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ, РЕКВІЗИТИ
ОПЛАТИ ТА ОСТАННІ НОМЕРИ НАУКОВОГО ЖУРНАЛУ «ТЕХНІЧНІ НАУКИ
ТА ТЕХНОЛОГІЇ» РОЗМІЩЕНО НА САЙТІ ЧЕРНІГІВСЬКОГО
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ:**

<http://tst.stu.cn.ua/>

Контактна інформація.

Матеріали необхідно надсилати на адресу: 14035, м. Чернігів, вул. Шевченка, 95, корп. 1, к. 242 (науково-дослідна частина).

Контактна особа: **Кормило Ірина Миколаївна.**

Тел. роб.: (0462) 66-51-15

Тел. моб.: (093) 592-78-12

E-mail: tst.technical.sj@gmail.com

**Відповідальність за матеріали, наведені у статті, несе автор.
Неправильно оформлені автором стаття та супровідні документи,
що не відповідають зазначеним вимогам, розглядатися не будуть.**

Редакція розглядає надходження публікації та супровідних документів (рецензії, довідки про авторів тощо) як згоду дописувача (ів) щодо передачі авторського права на використання твору (тиражування, розповсюдження тощо).

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

№ 1 (15)

Відповідальний за випуск
Коректор
Комп'ютерна верстка і макетування

С. П. Сапон
О. С. Смелова
Т. М. Колот

Підписано до друку 27.03.2019. Формат 60×84/8. Друк різнографія.
Ум. друк. арк. – 33,7. Тираж 100 пр. Замовлення № 465/19.

Редакційно-видавничий відділ Чернігівського національного технологічного університету
14035, Україна, м. Чернігів, вул. Шевченка, 95.

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців,
виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції
серія ДК № 4802 від 01.12.2014 р.