

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний
університет

НАУКОВІ НОТАТКИ

Міжвузівський збірник наукових праць
(за галузями знань «Фізико-
математичні науки» та «Технічні науки»)

Випуск 83

Луцьк 2025

Міжвузівський збірник наукових праць «Наукові нотатки» | «Naukovi Notatki» є фаховим виданням України, категорії Б.

Збірник зареєстрований Державною реєстраційною службою України (свідоцтво серія КВ, № 15901-4373ПР від 13.11.2019 р.). Збірнику присвоєно міжнародний стандартний серійний номер ISSN 24-15-39-66.

Рік заснування: 1993

Фахова реєстрація у ДАК України: Включено до категорії Б Переліку наукових фахових видань України за галузями знань «Фізико-математичні науки» та «Технічні науки» за науковими спеціальностями: 105 Прикладна фізика та наноматеріали; 131 Прикладна механіка; 113 Прикладна математика; 132 Матеріалознавство; 133 Галузеве машинобудування, 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – від 24.09.2020 р., Наказ МОН України № 1188

Періодичність – 4 рази на рік

Мова видання: українська, англійська

Засновник: Луцький національний технічний університет,

Україна, Волинська обл., 43018 Луцьк. вул. Львівська 75,

Редакція: тел. (0332) 26-25-19, E-mail: naukovi-notatki@lutsk-ntu.com.ua;
<http://eforum.lntu.edu.ua/index.php/naukovi-notatky>

Видання зареєстровано Національною радою України з питань телебачення і радіомовлення як суб'єкт у сфері друкованих медіа (рішення № 40 від 11.01.2024 р., ідентифікатор медіа **R30-2455**).

Склад редакції затверджено Вченою радою Луцького національного технічного університету (протокол №3 від 30.10. 2024 р.).

**Редакція збірника наукових праць
«Наукові нотатки» / «Naukovi Notatki»**
(Згідно постанови Кабінету Міністрів України
від 30 серпня 2024 р. № 1021 щодо нових галузей та спеціальностей)

Головний редактор:

Рудь Віктор Дмитрович д.т.н., проф., професор кафедри матеріалознавства Луцького національного технічного університету
(ORCID:0000-0001-5025-9510)

Заступники головного редактора:

Шимчук Сергій Петрович к.т.н., доц., доцент кафедри галузевого машинобудування Луцького національного технічного університету
(ORCID:0000-0002-1293-560X);

Мельничук Микола Дмитрович к.т.н., доц., завідувач кафедри матеріалознавства Луцького національного технічного університету
(ORCID:0000-0001-6813-250X);

Відповідальний секретар:

Клименко Олександр Дмитрович к.т.н., доцент, провідний фахівець бізнес-інноваційного центру Луцького національного технічного університету.
(ORCID:0000-0002-0959-7144).

Редакційна рада

Рудь Віктор Дмитрович, Шимчук Сергій Петрович, Мельничук Микола Дмитрович, Федосов Сергій Анатолійович, Клименко Олександр Дмитрович, Мартинюк Віктор Леонідович

Редакційна колегія:

Галузь знань G: Інженерія, виробництво та будівництво

Спеціальності: G9 – Прикладна механіка;

G11 – Машинобудування

Жигуц Юрій Юрійович д.т.н., проф., завідувач кафедри технології машинобудування Ужгородського національного університету
(ORCID:0000-0002-7477-7619);

Пальчевський Богдан Олексійович д.т.н., проф., професор кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Луцького національного технічного університету
(ORCID:0000-0002-4000-4992);

Заболотний Олег Васильович к.т.н., доц., доцент кафедри прикладної механіки та мехатроники Луцького національного технічного університету
(ORCID:0000-0002-9169-9173);

Мартинюк Віктор Леонідович к.т.н., доц., доцент кафедри галузевого машинобудування Луцького національного технічного університету
(ORCID:0000-0002-6914-2336);

Толстушко Микола Миколайович, к.т.н., доц., доцент кафедри галузевого машинобудування Луцького національного технічного університету
(ORCID:0000-0001-9230-3831);

Пуць Віталій Степанович к.т.н., доц., завідувач кафедри галузевого машинобудування Луцького національного технічного університету
(ORCID:0000-0003-3164-6173);

Самчук Людмила Михайлівна, к.т.н., доц., доцент кафедри прикладної механіки та мехатроніки Луцького національного технічного університету
(ORCID:0000-0003-2516-045X);

Ярошевич Микола Павлович, д.т.н., професор кафедри галузевого машинобудування Луцького національного технічного університету
(ORCID:0000-0002-2436-5608);

G8 Матеріалознавство.

Ткачук Валентина Віталіївна, д.т.н., проф. професор кафедри товарознавства та експертизи в митній справі Луцького національного технічного університету
(ORCID:0000-0001-5793-5227);

Бейгельзімер Ян Юхимович, д.т.н., проф., с.н.с Донецького фізико-технічного інституту ім. О.О.Галкіна, НАН України, Київ
(ORCID:0000-0002-1321-8565);

Кашицький Віталій Павлович к.т.н., доц., доцент кафедри матеріалознавства Луцького національного технічного університету
(ORCID: 0000-0003-2346-912X);

Садова Оксана Леонідівна, к.т.н., доц., доцент кафедри матеріалознавства Луцького національного технічного університету
(ORCID:0000-0002-6152-5447);

Зайчук Наталія Петрівна, к.т.н., доц., доцент кафедри матеріалознавства Луцького національного технічного університету
(ORCID:0000-0001-6258-48-20);

Гусачук Дмитро Анатолійович, к.т.н., доц., доцент кафедри матеріалознавства Луцького національного технічного університету
(ORCID:0000-0001-5899-1706);

Фещук Юрій Петрович, к.т.н., доц., доцент кафедри матеріалознавства Луцького національного технічного університету
(ORCID:0000-0001-6259-1916);

Баглюк Генадій Анатолієвич д.т.н., член-корес. НАНУ, директор Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України
(ORCID:0000-0002-3305-8896);

Лобода Петро Іванович д.т.н., проф., НТУ "КП" ім. І. Сікорського ІМЗ ім. Є.О. Патона, академік НАНУ

Штерн Михайло Борисович, д.т.н., член-корес. НАНУ, завідувач відділу Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України

(ORCID:0000-0002-7757-5721);

Грабар Іван Григорович, д.т.н., професор Житомирського національного агроекологічного університету

(ORCID:0009-0002-7193-6960);

Згалат-Лозинський Остап Броніславович, д.т.н., с.н.с. Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М.Францевича НАН України

(ORCID:0000-0002-7013-5010);

Уманський Олександр Павлович, д.т.н., проф. Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М.Францевича НАН України

(ORCID:0000-0003-3629-7224);

Сергєєв Володимир Володимирович, м.н.с., програміст ТОВ «Хайку Україна»

(ORCID:0009-0009-8665-7006).

Галузь знань Е: Природничі науки, математика та статистика

Е6 Прикладна фізика та наноматеріали

Захарчук Дмитро Андрійович, к. фіз.-мат. н., доцент завідувач кафедри фізики та математики Луцького національного технічного університету

(ORCID:0000-0002-1988-5027);

Луцьов Сергій Валентинович д. ф-м. н., професор кафедри фізики та математики Луцького національного технічного університету

(ORCID:0000-0003-0737-8703);

Федосов Сергій Анатолійович д. ф-м. н., професор кафедри фізики та вищої математики Луцького національного технічного університету

(ORCID:0000-0003-3457-8911);

Мікуліч Олена Аркадіївна д.т.н., професор, завідувач кафедри прикладної математики та механіки Луцького національного технічного університету

(ORCID:0000-0003-4522-596X);

Майстренко Анатолій Львович д.т.н., проф., завідувач відділу Комп'ютерного матеріалознавства надтвердих композиційних матеріалів для породоруйнівних інструментів Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України;

Никируй Любомир Іванович, к.ф-м.н., професор Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника

(ORCID:0000-0002-3754-0348).

Закордонні члени редколегії:

Рібейро Луїс Фролен д.т.н., проф., професор Політехнічного інституту Браганси (Португалія);

Елісон МакМілан (Alison J Mcmillan), Professor (Full) in Aerospace Technology, Wrexham Glyndwr University, United Kingdom;

Єфременко Василь Георгійович д.т.н., професор Institute of Materials Research of Slovak Academy of Sciences
(ORCID: 0000-0003-0438-6433);

Яцек Щот (Jacek Szczot) PhD, голова правління машинобудівного підприємства з виготовлення високоточного обладнання WSK Poznan, Польща;

Стельмах Олександр Устинович д.т.н., професор Пекінського технологічного інституту
(ORCID:0000-0002-9132-6334);

Orlov Dmytro, PhD, Professor (Full), Lund University, Sweden;

Halfa Hossam Ahmed Mohamed, Dr., PhD Central Metallurgical R&D Institute (CMRDI), Cairo, Egypt
(ORCID: 0000-0002-5063-5026);

Silva João Francisco, Professor Department Materials Science, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal,
(ORCID: 0000-0002-9061-2187);

Grabowska Karolina, Associate Professor Deputy Dean of Faculty of Science and Technology Jan Dlugosz University in Czestochowa, Poland;
(ORCID: 0000-0002-8323-8094);

Kozub Barbara Associate Professor Deputy Head of the Department of Material Engineering at the Faculty of Materials Engineering and Physics of the Cracow University of Technology, Poland;
(ORCID: 0000-0002-5155-1940);

Lin Wei-Ting, Professor Head and Professor, Dept. of Civil Engineering, National Ilan University, Taiwan;
(ORCID: 0000-0003-4792-4457);

Turmanidze Lela, Professor Dean of Faculty of Exact Sciences and Education, Batumi Shota Rustaveli State University, Georgia
(ORCID: 0000-0002-0721-8454).

ЗМІСТ

Зміст	7
М. А. Тесля, Є. В. Солодкий Термодинамічний аналіз процесів отримання бінарної Сг-Та лігатури.....	9
П.І. Лобода, Н.А. Шаповалов, П.А. Балашкевич, І.Ю. Троснікова Отримання порошків на основі вольфраму відновленням у водні.....	14
А. В. Букетов, В. Ю. Стрельченко Дослідження динамічної в'язкості епоксидних композицій з нано- і мікронаповнювачами.....	18
В. Ю. Кондусь Дослідження робочих характеристик вільновихрових насосів при роботі у робочому діапазоні $Q = 0,7-1,2 Q_{ном}$	24
Д.М. Червінко, Л.С. Яблонь, В.О. Коцюбинський, Б. І. Рачій, О.П. Паховський, І.М. Гасюк Аналіз комплексної електричної провідності тканини печінки свині.....	37
М. Є. Чернова Фізика аспектів гідродинамічних явищ у технологічних процесах.....	42
В.О. Шейченко, Ю.Б. Скоряк, С.А. Скоряк, О.В. Шаповал Імітаційне моделювання втрат через несвоєчасне проведення посівів.....	50
О.О. Гончарук, Л.Ф. Головки, О.Д. Кагляк, С.М. Волошко, А.П. Бурмак Термодформаційне лазерне спікання алмазовмісних композитів для абразивної обробки виробів машинобудування.....	54
М.В. Романенко, О.Д. Кагляк, В.В. Романенко, А.В. Бернацький Експериментальне дослідження газолазерного різання нержавіючих сталей потужним лазерним випромінюванням.....	61
О.І. Сипягін, О. В. Швайкін, В. С. Лопухович Вплив стиснення даних на ефективність прямої взаємодії сервісів у мікросервісній архітектурі.....	70
В.М. Франчук, Л.М. Самчук, Ю.В. Шишко Аналіз технологій зварювання для автомобільної галузі.....	75
Р.М. Харак, О.С. Гізатуллін Обґрунтування конструкційної схеми електронного тахометра для дизеля.....	80
О.І. Мохонько, А.І. Іванісік Оптимізація моделювання вимушеного раманівського розсіювання в самофокусуючих рідинах.....	86
Г.Д. Ільницька, В.Є. Діюк, В.І. Лавріненко, В.В. Смоквина, О.Б. Логінова, І.М. Зайцева, С.П. Старик Поверхневі властивості алмазних шліфпорошків марки АС250 різних зернистостей.....	93
Н.Ю. Імбірович, Ю.В. Шишко, В.В. Ткачук, І.В. Боярська, Д.А. Гусачук Режими синтезу конверсійних плазмоелектролітичних покриттів на цирконієвій основі та їх корозійні властивості.....	99
Я.М. Пелех, О.П. Козарь, Т.В. Магеровська, С.М. Ментинський, Я.П. Легета Метод визначення напруженості магнітного поля в шарі електротехнічної сталі.....	105
Н.О.Олійник, Г.Д.Ільницька, Г.А.Петасюк, О.М.Сизоненко, В.Д.Рудь, Г.А.Базалій, С.Д. Заболотний, М.М.Циба Аналіз обмежень машинного навчання у прогнозуванні спортивних результатів.....	114
В. Пуць, Т. Ярошевич, М. Ярошевич, Є. Станкевич Самосинхронізація віброзбудників вібраційних машин з бігармонічними коливаннями робочого органу.....	119
Г. М. Губаль, О. Б. Панасенко, В. М. Пугачов Теорія ігор у бізнесі: математичні моделі взаємодії.....	124
С.Ф. Юхимчук, Т.Л. Дацюк, С.М. Юхимчук, Л.М. Дацюк Розробка нахилювача стебел льону для льонобрального апарата.....	131
В. І. Осипенко, Л. Д. Мисник, М.В. Хандюк, Л.М. Мізнік Особливості кінетики сушіння твердих відходів птахофабрик як основа удосконалення схеми виробництва органічних добрив.....	136
Р.Є. Костюнік, О.У. Стельмах, О.В. Куцев Комплексне вирішення проблеми видалення забруднень з миючої рідини технологічних приладів, використовуваних для промислової очистки підшипників.....	142
В.І. Осипенко, М.В. Хандюк, Л.М. Мізнік, Л. Д. Мисник Технологічні аспекти підвищення ефективності виготовлення обсмаженого та протертого напівфабрикату з ріпчастої цибулі.....	150
М. М. Толстушко, Н. О. Ференц, Ю. Е. Павлюк, І. П. Кравець, А. С. Лин Аналіз вибухопожежонебезпеки видобування природного газу.....	156
О.С. Ковалишин Генеративні агентні рішення штучного інтелекту для забезпечення якості програмного забезпечення.....	160
О.О. Ягелюк, О.С. Приходько Методика прогнозування врожайності льону-волокна та насіння за допомогою БПЛА-зйомки та автоматизованого аналізу.....	166
С.М. Плєскул, Ю.П. Дягілев, Г.А. Баглюк, Є.В. Полункін Синтез нітрокрохмалю: кореляція між методологією нітрування, структурними характеристиками та функціональними властивостями у контексті створення високоенергетичних матеріалів.....	172
С.М. Баранович, І.Г. Стукалець, С.В. Коробка, М.І. Бабич, М.М. Толстушко, Н.О. Толстушко Дослідження гідрогазодинамічних процесів у закритих перепускних каналах круглого та трикутного перерізу.....	177

CONTENTS

Contents	8
M. A. Teslya, E. V. Solodkyi Thermodynamic analysis of obtaining binary Cr-Ta ligature.....	9
P.I. Loboda, N.A. Shapovalov, P.A. Balashkevych, I.Yu. Trosnikova Production of tungsten-based powder by reduction in hydrogen.....	14
A. V. Buketov, V. Yu. Strelchenko Study of dynamic viscosity of epoxy compositions using nano- and micro-fillers.....	18
V. Kondus Investigation of the operational characteristics of torque-flow pumps within the operating range $Q = 0.7-1.2 Q_{nom}$	24
D.M. Chervinko, L.S. Yablon, V.O. Kotsiubynskyi, B.I. Rachii, O.P. Pakhovskiy, I.M. Hasiuk Analysis of the complex electrical conductivity of porcine liver tissue.....	37
M.Je. Chernova Physics of aspects in hydrodynamic phenomena in technological processes.....	42
V.O. Sheichenko, Y.B. Skoriak, S.A. Skoriak, O.V. Shapoval Simulation modeling of losses due to delayed sowing	50
O.O. Honcharuk, L.F. Holovko, O.D. Kahliak, S.M. Voloshko, A.P. Burmak Thermo-deformation laser sintering of diamond-containing composites for abrasive machining of machine-building products.....	54
M.V. Romanenko, O.D. Kagliak, V.V. Romanenko, A.V. Bernatskyi Experimental research of gas laser cutting of stainless steels with high-power laser radiation	61
O. Sypiakhin, O. Shvaikin, V. Lopukhovych The impact of data compression on the efficiency of direct interaction between services in a microservice architecture.....	70
V.M. Franchuk, L.M. Samchuk, Y.V. Shyshko Analysis of welding technologies for the automotive industry.....	75
R.M. Kharak, O.S. Hizzatullin Justification of the design scheme of an electronic tachometer for a diesel engine.....	80
O. Mokhonko, A. Ivanisik Optimization of stimulated raman scattering modeling in self-focusing liquids....	86
H.D. Ilnytska, V.E. Diyuk, V.I. Lavrinenko, V.V. Smokvyna, O.B. Loginova, I.M. Zaitseva, S.P. Starik Surface properties of diamond grinding powders of the AC250 brand of different grain sizes.....	93
N.Yu. Imbirovych, Yu. V. Shyshko, V.V. Tkachuk, I. V. Boiarska, D. A. Husachuk Synthesis modes of conversion plasma-electrolytic coatings synthesized on zirconium base and their corrosion properties.....	99
Ya.M. Pelekh, O.P. Kozar, T.V. Maherovska, S.M. Mentynsky, Ya.P. Legeta Method for determining the magnetic field strength in a sheet of electrical steel.....	105
N.O. Oliinyk, H.D. Ilnytska, G.A. Petasyuk, O.N. Sizonenko, V.D. Rud, G. A. Bazaliy, S. D. Zabolotnyi, M.M. Tsyba Experimental studies on the preparation of functionally oriented synthetic diamond powder.....	104
V. Puts, T. Yaroshevich, M. Yaroshevych, E. Stankevych Self-synchronization of vibration exciters of vibrating machines with biharmonic oscillations of the working body.....	119
H. Hubal, O. Panasenko, V. Pugachov Game theory in business: mathematical models of interaction..	124
S.F. Yukhymchuk, T.L. Datsyuk, S.M. Yukhymchuk, L.M. Datsyuk Development of a device for inclining flax stalk for a flax-pulling apparatus.....	131
V.I. Osypenko, L.D. Mysnyk, M.V. Handiuk, L.M. Miznik Features of the kinetics of drying solid waste from poultry farms as a basis for improving the production scheme of organic fertilizers	136
R.E. Kostyunik, O.U. Stelmakh, O.V. Kushchev Complex solution of the problem of removing contamination from the washing liquid of technological devices used for industrial cleaning of bearings.....	142
V.I. Osypenko, M.V. Khandyuk, L.M. Miznik, L. D. Mysnyk Technological aspects of improving the efficiency of manufacturing roasted and grated semi-finished products from onions.....	150
M. Tolstushko, N. Ferents, YU. Paviuk, I. Kravets, A. Lun Explosion and fire hazard analysis of natural gas extraction.....	156
O. Kovalyshyn Generative artificial intelligence agent solutions for software quality assurance.....	160
O. Yaheliuk, O. Prykhodko Methodology for predicting flax fiber and seed yields using uav photography and automated photoanalysis.....	166
S.M. Pleskun, Yu.P. Dyagilev, H.A. Bagliuk, Ye.V. Polunkin Synthesis of nitrostarch: correlation between nitration methodology, structural characteristics, and functional properties in the context of developing high-energetic materials.....	172
S. Baranovych, I. Stukalets, S. Korobka, M. Babych, M. Tolstushko, N. Tolstushko Study of hydro-gas-dynamic processes in closed bypass channels with circular and triangular cross-sections.....	177

М. А. Тесля, Є. В. Солодкий

*Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"***ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ОТРИМАННЯ БІНАРНОЇ Cr-Ta ЛІГАТУРИ**

Проведено термодинамічну оцінку та дослідження закономірностей фазоутворення в системі Cr-Ta під час сумісного відновлення оксидів Cr₂O₃ та Ta₂O₅ вуглецем за температури 1000 °C. Показано, що в присутності відновника (вуглецю) теплова енергія спрямовується на відновлення оксидів Cr₂O₃ та Ta₂O₅. Це перешкоджає реакції між відновленими металами та як наслідок лімітує утворення стабільних фаз Cr₂Ta. Встановлено, що застосування способу сумісного відновлення не тільки сприяє формуванню стабільного твердого розчину Cr-Ta, а й зменшує середній розмір частинок відновленого порошку до 2 мкм.

Ключові слова: відновлення, жароміцні сплави, інтерметаліди, карботермія, молібденові сплави, порошкова металургія, фази Лавеса.

M. A. Teslya, E. V. Solodkyi

THERMODYNAMIC ANALYSIS OF OBTAINING BINARY Cr-Ta LIGATURE

Thermodynamic assessment and study of phase formation patterns in the Cr-Ta system during the simultaneous carbothermal reduction of Cr₂O₃ and Ta₂O₅ oxides with carbon at a temperature of 1000 °C were carried out. It is shown that in the presence of a reducing agent (carbon), thermal energy is directed to the reduction of Cr₂O₃ and Ta₂O₅ oxides. This prevents the reaction between the reduced metals and, as a result, limits the formation of stable Cr₂Ta phases. It was established that the use of the adjacent reduction method not only contributes to the formation of a stable Cr-Ta solid solution, but also reduces the average particle size of the reduced powder to 2 μm.

Keywords: reduction, heat-resistant alloys, intermetallics, carbothermy, molybdenum alloys, powder metallurgy, Laves phases.

Постановка проблеми. Сучасні матеріалознавчі дослідження направлені на пошук ефективних рішень у питаннях розробки деталей машинобудування, що володіють високою стійкістю до зносу та втоми. Однією з галузей, що потребує розробки альтернативних матеріалів, є виробництво лопаток газо-турбінних двигунів. Традиційно для виготовлення деталей даного типу використовують сплави на основі нікелю, що відрізняються відмінною корозійною стійкістю і здатні витримувати нагрів до 1150 °C [1]. Проте, відповідно до результатів проведеного моделювання підвищення робочої температури згорання палива всередині двигуна може значно підвищити ефективність його роботи [2].

Альтернативним підходом до виробництва газотурбінних лопаток є виготовлення композиційних матеріалів, що складаються з тугоплавкого каркасу та легкоплавкої складової, яка під час нагрівання до критичної температури випаровується. Такі матеріали можуть ефективно працювати у температурному діапазоні до 1500 °C, проте їх повторне використання неможливе через незворотні втрати матеріалу [3]. Водночас високотемпературні керамічні матеріали та композити, що здатні працювати за температур до 3000 °C володіють низькою пластичністю, тріщиностійкістю, ударною в'язкістю та стійкістю до термоциклічних навантажень [4]. Саме тому сьогодні використання високотемпературної кераміки вкрай обмежене у вузлах, які окрім високих температур піддаються також циклічним механічним навантаженням.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Використання сплавів на основі тугоплавких металів, що володіють достатнім рівнем механічних властивостей, корозійною стійкістю та жароміцністю може не тільки забезпечити високу температуру експлуатації, а й значно продовжити тривалість роботи окремих вузлів та деталей [2]. Серед тугоплавких металів за комплексом фізико-механічних властивостей перспективним є використання молібдену, який попри високу температуру плавлення ($T_{пл} = 2623$ °C) схильний до взаємодії з киснем з утворенням леткого оксиду MoO₃ за температур понад 400 °C [5].

Зважаючи на високу температуру плавлення у сучасній практиці виробництво деталей з молібдену або сплавів на його основі здійснюється переважно методами порошкової металургії [6]. Застосування такого підходу дозволяє не тільки формувати вироби з тугоплавких металів, а й сприяє рівномірному розподіленню легуючих елементів в об'ємі сплаву.

Рівномірний розподіл легуючих елементів в структурі є особливо актуальним завданням в контексті отримання сплавів на основі молібдену, які з метою підвищення окисної стійкості

додатково легують такими елементами, як хром і тантал. В роботах [7–9] показано, що за наявності у структурі сплаву фаз твердого розчину Мо-Ta-Cr в умовах підвищених температур формується щільний оксидний шар складу CrTaO_4 , який перешкоджає активному окисненню молібдену. За рахунок утворення плівки CrTaO_4 на поверхні молібденового сплаву вдається забезпечити стабільну роботу деталей за температур до 1200 °C.

Натомість під час виготовлення сплаву Мо-Ta-Cr із суміші чистих порошків в мікроструктурі відслідковуються включення фази Лавеса – Cr_2Ta , яка не тільки перешкоджає утворенню оксидної плівки CrTaO_4 через високу термодинамічну стабільність, а й додатково знижує пластичність отриманого сплаву [10]. Саме тому технологія виготовлення сплавів молібдену, легованих хромом та танталом потребує удосконалення з метою отримання контрольованої структури з мінімальним вмістом фази Лавеса Cr_2Ta .

В практиці порошкової металургії досить ефективним є спосіб відновлення оксидів металів, який дозволяє не тільки контролювати хімічний склад і фізико-технологічні властивості порошків, а й сприяє зменшенню середнього розміру частинок [11]. В роботах [12, 13] показано, що для відновлення оксиду хрому досить ефективним є використання вуглецю як відновника через високу стабільність сполуки Cr_2O_3 . Аналогічно для відновлення оксиду танталу Ta_2O_5 використання вуглецю як відновника є доцільним за умови точного контролю вмісту вуглецю у суміші [14].

Постановка завдань. Виходячи з вище викладеного в роботі поставлено мету – провести термодинамічну оцінку можливості отримання твердого розчину Cr-Ta внаслідок суміжного відновлення відповідних оксидів вуглецем та дослідити мікроструктуру і хімічний склад отриманих порошків.

Викладення основного матеріалу. В роботі було проведено дослідження закономірностей структуроутворення у процесі суміжного відновлення Cr_2O_3 і Ta_2O_5 вуглецем. Для попередньої оцінки можливості хімічних реакцій в системі було проведено термодинамічні розрахунки ймовірних процесів, які базувалися на загальних принципах взаємодії оксидів з відновником (вуглецем), відновлених металів з вуглецем та відновлених металів між собою. Таким чином в роботі для термодинамічної оцінки процесів розглядали такі хімічні реакції:



Для оцінки ймовірності проходження кожної із зазначених реакцій було проведено розрахунки залежності вільної енергії Гіббса від температури згідно рівняння:

$$\Delta G_T^0 = \Delta H_T^0 - T\Delta S_T^*,$$

де ΔH_0^0 – тепловий ефект реакції за 298 K;

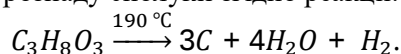
ΔS_T^* – зміна стандартної ентропії системи.

Розрахунки проводились за допомогою програмного забезпечення FactSage. Вихідні дані щодо ентальпії та ентропії утворення окремих сполук у температурному діапазоні від 20 °C до 1000 °C були автоматично опрацьовані з наукової бази даних програмного забезпечення FactSage. Відповідно до проведених розрахунків побудовано діаграму залежності вільної енергії Гіббса від температури для можливих реакцій в системі Cr_2O_3 - Ta_2O_5 -C (рис. 1).

Згідно базовим уявленням термодинаміки найімовірнішими вважаються реакції, для яких характерним є найменше значення вільної енергії Гіббса. З рисунку 1 видно, що за температури понад 600 °C в системі найбільш ймовірними є реакції відновлення оксиду танталу, формування карбіду танталу та відновлення оксиду хрому. Натомість реакція між відновленими металами з утворенням фази Лавеса Cr_2Ta є найменш ймовірною за даних умов. Це підтверджує гіпотезу, що за присутності відновника енергія від підведеного тепла перерозподілятиметься на процеси відновлення, що в свою чергу значно лімітуватиме реакцію між чистими металами.

З метою дослідження структури порошку після суміжного відновлення оксидів було виготовлено суміш 25,6 мас. % Cr_2O_3 + 74,4 мас. % Ta_2O_5 , що відповідає 50 ат. % Cr + 50 ат. % Ta після відновлення.

Як джерело вуглецю використовували $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$ (гліцерин) з метою рівномірного розподілу атомарного вуглецю в системі після розпаду сполуки згідно реакції:



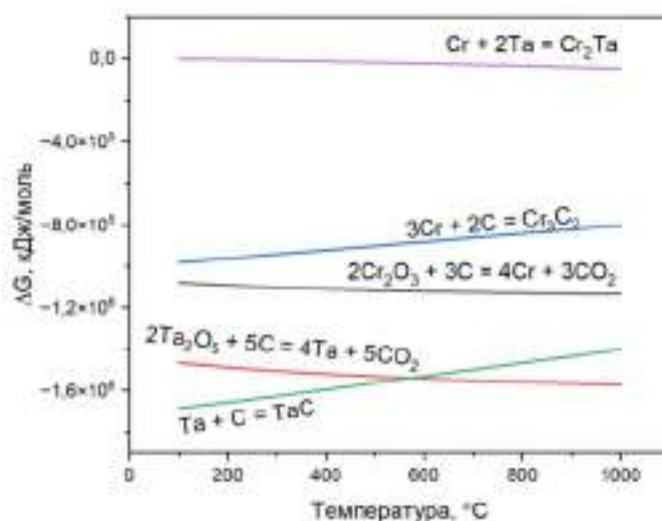


Рис. 1. Залежність вільної енергії Гіббса від температури для реакцій 1-5

Кількість гліцерину була розрахована виходячи з реакцій 1-2 для забезпечення повного відновлення оксидів та обмеження можливості проходження реакцій 3 та 4 з утворенням карбідів. Відновлення досліджуваної суміші порошок оксидів проводили в середовищі аргону в умовах нагрівання від кімнатної температури до 1500 °C зі швидкістю 1 °C/хв. Після досягнення максимальної температури порошок піддавали ізотермічній витримці протягом 30 хв.

З метою встановлення температурних меж та інтенсивності проходження хімічних реакцій в системі було проведено дослідження за методом диференціальної скануючої калориметрії (ДСК). Цей метод допомагає встановити наявність ендо- та екзотермічних реакцій в системі шляхом фіксування зміни теплових потоків впродовж нагрівання. Вимірювання проводили за допомогою диференціально скануючого калориметра DSC PT1600 (Linseis Messgeraete, Vielitzerstr, Germany). За результатами дослідження побудовано криву в координатах тепловий потік (мВт/мг) – час (с) при зміні температури від кімнатної до 1500 °C (рис. 2).

З рисунку 2 видно, що на початкових етапах нагрівання при досягненні температури 190 °C відбувається розкладання гліцерину з виділенням води та водню. За таких температур вода починає активно випаровуватися, поглинаючи теплову енергію, тому на кривій бачимо локальний мінімум в околі 200 °C. Подальше зростання теплового потоку з досягненням максимуму в точці 7500 с свідчить про інтенсифікацію відновних процесів, які супроводжуються активним виділенням CO₂. На проміжку від 600 °C до 1400 °C крива має спадаючий характер, що свідчить про згасання інтенсивності відновних реакцій. Після досягнення температури 1400 °C на кривій бачим утворення невеликого піку, що може свідчити про зменшення системою вільної енергії шляхом утворення конгломератів. Цей процес досягає максимуму внаслідок нагріву до 1500 °C та сповільнюється при ізотермічній витримці.

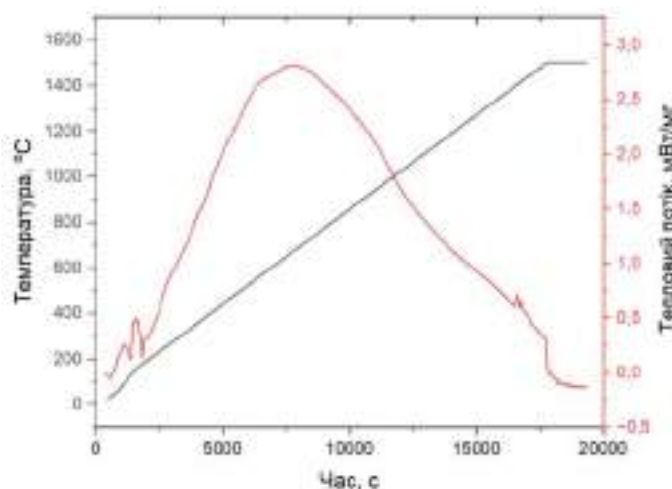


Рис. 2. Зміна теплового потоку в системі Cr₂O₃-Ta₂O₅- C₃H₈O₃ при нагріванні до 1500 °C

Макроаналіз порошку після відновлення показав, що відновлення пройшло достатньо ефективно, про що свідчить зміна кольору порошку з зеленого (Cr_2O_3) на сріблястий. З метою детального аналізу мікроструктури та хімічного складу суміші після відновлення, порошок досліджували методами електронної скануючої мікроскопії. Дослідження проводили за допомогою електронного мікроскопу Axia ChemiSEM, обладнаного енергодисперсійним аналізатором. Результати дослідження мікроструктури отриманого порошку зображено на рисунку 3, а.

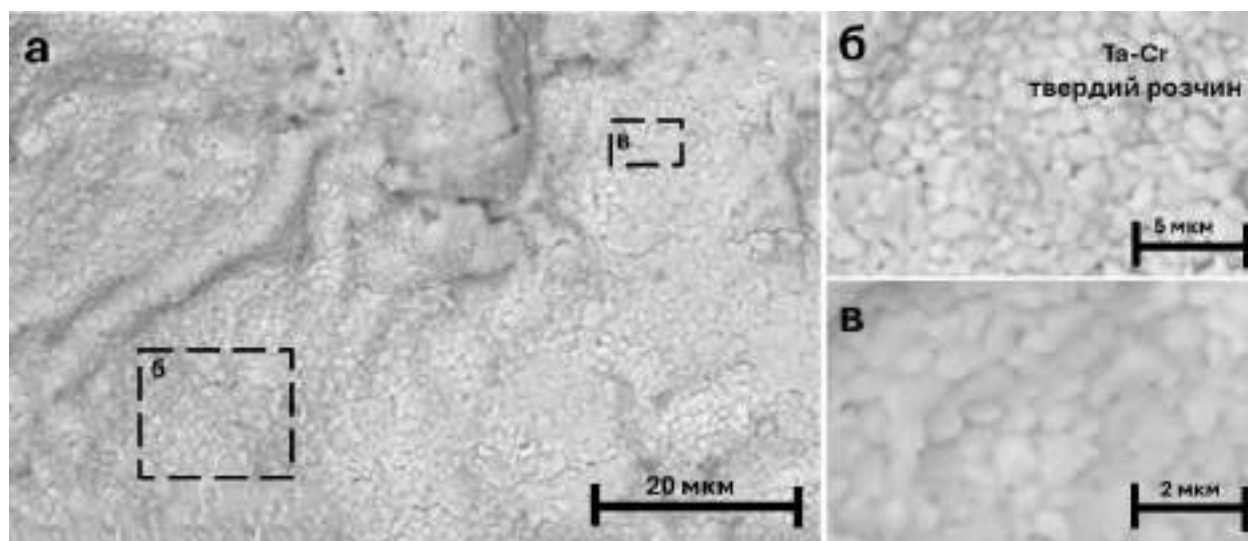


Рис. 3. Мікроструктура порошку складу Cr-Ta після відновлення вуглецем:
(а) загальний вигляд частинок порошку; (б) та (в) зеренна структура хром-тантал

З рисунку 3 б, в бачимо, що структура порошку є однорідною і переважно складається з крупних конгломератів, які є скупченням відновлених металевих частинок розміром 1-2 мкм. Це узгоджується з теоретичними даними щодо процесу відновлення, згідно яких у процесі відновлення порошки додатково подрібнюються за рахунок декількох факторів. З одного боку відновлення оксиду металу супроводжується зміною типу і параметрів кристалічної ґратки (табл. 1). Не когерентність ґраток оксиду і чистого металу виникають внутрішні напруження, що можуть спричинити руйнування матеріалу. Описане явище інтенсифікується за рахунок різної кінетики відновлення частинки.

З іншого боку подрібнення порошку в процесі відновлення може бути зумовлено активним газовиділенням, що супроводжує хімічну реакцію. Для досліджуваної системи $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Ta}_2\text{O}_5\text{-C}$ під час взаємодії оксидів з відновником характерне виділення газу CO_2 , який провокує утворення пор, що в подальшому може спричиняти руйнування цілісності частинки як концентратор механічних та термодинамічних напружень.

Табл. 1

Параметри кристалічної ґратки оксидів та чистих металів

Параметр	Cr_2O_3	Cr	Ta_2O_5	Ta
Тип кристалічної ґратки	Тригональна	ОЦК	Орторомбічна	Тетрагональна
a	4,953 Å	2,885 Å	3,82 Å	10,22 Å
b	4,953 Å	2,885 Å	3,89 Å	10,22 Å
c	13,578 Å	2,885 Å	12,97 Å	5,30 Å
Джерело	[12]	[12]	[14]	[14]

Описані процеси спричиняють формування пористої крихкої структури, яка під дією високих температур може формувати конгломерати з дрібнодисперсних частинок. Контроль розміру порошку після відновлення здійснюється шляхом регулювання температури та часу ізотермічної витримки.

Висновки. В роботі проведено термодинамічний аналіз процесів суміжного відновлення оксидів хрому та танталу вуглецем. Відповідно до отриманих результатів встановлено, що в процесі суміжного відновлення теплова енергія перерозподіляється в системі на відновлення оксидних сполук, що перешкоджає реакції між відновленими металами з утворенням Лавес-фази Cr_2Ta . Дослідження мікроструктури порошку після відновлення показало характерне зменшення

середнього розміру частинок порошку до 2 мкм, що пояснюється розповсюдженням тріщин частинкою внаслідок утворення газової пористості та концентрації термомеханічних напружень всередині частинки. Додаткова ізотермічна витримка сприяє утворенню конгломератів з відновлених частинок. Однорідність мікроструктури після відновлення може свідчити про утворення стабільного твердого розчину Cr-Ta, необхідного для ефективного легування сплавів на основі молібдену для підвищення їх корозійної стійкості.

Література

1. Reed, R. C (2008). The Superalloys: Fundamentals and Applications. Cambridge: Cambridge University Press. ISBN 9780521070119.
2. D. D. Richter and M. L. Mobley, "The hotter the Engine, the Better," Science (1979), vol. 326, no. 5956, pp. 1067–1068, Nov. 2009, doi: 10.1126/science.1179117.
3. Дурягіна З. А. Сплави з особливими властивостями / З.А. Дурягіна, О. Я. Лизун, В. Л. Пілюшенко. — Л. : Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2007. — 236 с.
4. Guo-Jun Zhang, Wei-Ming Guo. Ultrahigh temperature ceramics (UHTCs) based on ZrB₂ and HfB₂ systems: Powder synthesis, densification and mechanical properties / Guo-Jun Zhang, Wei-Ming Guo, De-Wei Ni and Yan-Mei Kan // Journal of Physics: Conference Series. – 2009. – Vol. 176. – P. 12-41.
5. Applications of Molybdenum Metal and its Alloys. Second, completely revised edition 2013 // IMOА. — ISBN 978-1-907470-30-1
6. Research progress and development of strengthening-toughening methods for molybdenum alloys prepared by powder metallurgy / Y. Wei [et al] // Journal of Alloys and Compounds. – 2024. – P. 177099.
7. S. Zhang et al., "Microstructure, elastic/mechanical and thermal properties of CrTaO₄: A new thermal barrier material?," Journal of Advanced Ceramics, vol. 13, no. 3, pp. 373–387, Mar. 2024, doi: 10.26599/JAC.2024.9220862.
8. S. Schellert, B. Gorr, S. Laube, A. Kauffmann, M. Heilmaier, and H. J. Christ, "Oxidation mechanism of refractory high entropy alloys Ta-Mo-Cr-Ti-Al with varying Ta content," Corros Sci, vol. 192, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.corsci.2021.109861.
9. S. Schellert et al., "Formation of rutile Cr, Ta, TiO₂ oxides during oxidation of refractory high entropy alloys in Ta-Mo-Cr-Ti-Al system," Corros Sci, vol. 211, no. 110885, 2023.
10. F. Stein and A. Leineweber, "Laves phases: a review of their functional and structural applications and an improved fundamental understanding of stability and properties," Mar. 01, 2021, Springer. doi: 10.1007/s10853-020-05509-2.
11. Степанчук А.М. Теоретичні та технологічні основи отримання порошків металів, сплавів та тугоплавких сполук: Підручник / А.М. Степанчук. – Київ: НТУУ "КПІ", 2006. – С. 226–316
12. Simonov, V.K., Grishin, A.M. Thermodynamic analysis and the mechanism of the solid-phase reduction of Cr₂O₃ with carbon: Part 1. Russ. Metall. 2013, 425–429 (2013). <https://doi.org/10.1134/S0036029513060153>.
13. Аналіз можливостей інтенсифікації твердофазного відновлення Cr₂O₃ вуглецем / О. М. Гришин, А. А. Надточій, Н. М. Великонська // Теорія і практика металургії. – 2019. – Вип. 6. – С. 5–12.
14. Hamilton, C. B. and Wilhelm, H. A. (1961) "The Preparation of Tantalum Metal by the Carbon Reduction of Tantalum Pentoxide," Proceedings of the Iowa Academy of Science, 68(1), 189-201.

Рецензент: Втерковський Михайло Ярославович, PhD, асистент КПІ ім. Ігоря Сікорського, НН ІМЗ ім. Є. О. Патона, каф. ВТМ та ПМ

П.І. Лобода, Н.А. Шаповалов, П.А. Балашкевич, І.Ю. Троснікова

*Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»***ОТРИМАННЯ ПОРОШКІВ НА ОСНОВІ ВОЛЬФРАМУ ВІДНОВЛЕННЯМ У ВОДНІ**

У статті розроблено метод отримання порошків на основі вольфраму відновленням у водні. Встановлено технологічні характеристики синтезу, що дозволило отримати порошки на основі вольфраму із заданими фізичними та технологічними властивостями. Встановлено морфологічні особливості частинок отриманих порошків, їх хімічний та фазовий склад, а також насипну щільність та щільність утруски, пресуємість.

Ключові слова: відновлення у водні, вольфрам, порошки, хімічний склад, фазовий склад

P.I. Loboda, N.A. Shapovalov, P.A. Balashkevych, I.Yu. Trosnikova

PRODUCTION OF TUNGSTEN-BASED POWDER BY REDUCTION IN HYDROGEN

The article develops a method for obtaining tungsten-based powders by reduction in hydrogen. Technological characteristics of the synthesis are established, which allowed obtaining tungsten-based powders with specified physical and technological properties. Morphological features of the particles of the obtained powders, their chemical and phase composition, as well as bulk density and compaction density, and compressibility are established.

Keywords: reduction in hydrogen, tungsten, powders, chemical composition, phase composition

Вступ. Для створення облицювання кумулятивних зарядів часто використовують матеріали з високою щільністю і пластичністю. Серед найбільш поширених матеріалів для цієї мети варто виділити мідь, нікель, алюміній, технічне залізо та низьковуглецеву сталь. Ці матеріали утворюють високощільні суцільні струмені з великою пробивною здатністю [1]. Облицювання також може бути виготовлене з інших матеріалів, таких як вольфрам, тантал, молібден або композиційні матеріали, вибір матеріалу залежить від конкретного завдання. Хоча мідь була одним з перших матеріалів, що використовувалися для виготовлення облицювань кумулятивних зарядів, вона залишається цікавою та перспективною для подальших досліджень та використання [2].

Авторами роботи [2] вивчався вплив матеріалу облицювання та типу вибухової речовини на формування струменя кумулятивного заряду. Експериментальні випробування кумулятивних зарядів з облицюванням з міді проводилися на сталевій пластині, а отримані дані використовувалися для перевірки чисельної моделі кумулятивного заряду. Встановлено, що облицювання з міді та танталу формували когерентний струмінь, тоді як облицювання з алюмінію утворювали струмінь із частинок. Крім того, струмені, утворені з мідних облицювань, досягали вищої пікової швидкості, у порівнянні з танталовими.

Вибір матеріалу облицювання має вирішальне значення для формування та ефективності кумулятивного струменя. Різні властивості матеріалів, такі як щільність (ρ), теплопровідність (k) та механічна міцність (представлена модулем Юнга E та межею текучості σ_y) істотно впливають на кінетичні та термодинамічні характеристики кумулятивного струменя.

Вища щільність облицювання сприяє формуванню більш масивного та ефективного кумулятивного струменя, який може проникати глибше в ціль. Щільність впливає на масу струменя, а, отже, на його кінетичну енергію. Для облицювань з вищою щільністю потенціал кінетичної енергії струменя вищий.

Теплопровідність визначає наскільки швидко тепло може розповсюджуватися від точки детонації через облицювання. Вища теплопровідність може сприяти більш рівномірному розподілу температури та зменшенню локалізованих зон перегріву, що можуть ослабити структуру струменя. Водночас, висока теплопровідність може зменшувати температурний градієнт, необхідний для швидкого формування кумулятивного струменя.

Міцність матеріалу, особливо межа текучості (σ_y) та модуль Юнга (E), впливає на його здатність витримувати великі навантаження без деформації. В контексті кумулятивних зарядів, матеріали з високою міцністю сприяють більш ефективному формуванню струменя, оскільки вони можуть витримати інтенсивний ударний тиск без значної деформації.

Математично вплив матеріалу облицювання на кумулятивний струмінь може бути проілюстрований через рівняння балансу імпульсу та енергії, а також через аналітичні та числові рівняння, які моделюють поведінку матеріалу під високим тиском і високою температурою.

© П.І. Лобода, Н.А. Шаповалов, П.А. Балашкевич, І.Ю. Троснікова

Застосування цих моделей і розрахунків дозволяє точно спрогнозувати поведінку кумулятивного струменя в залежності від вибору матеріалу облицювання [2].

Вплив матеріалів облицювання на характеристики кумулятивних зарядів є критично важливим аспектом у розробці та оптимізації вибухових пристроїв. Матеріал облицювання, розташований усередині порожнини кумулятивного заряду, безпосередньо впливає на формування та характеристики кумулятивного струменя, що формується під час детонації.

Облицювання, зазвичай, виготовлене з металу, відіграє ключову роль у процесі формування струменя. Під час вибуху високий тиск та температура перетворюють метал облицювання у високошвидкісний струмінь, здатний проникати через товсті броньовані плити або інші перешкоди. Вибір матеріалу облицювання безпосередньо впливає на швидкість, густину та здатність струменя до проникнення.

Таким чином, розвиток матеріалів для облицювання кумулятивних зарядів і вдосконалення їх конструкції веде до постійного покращення характеристик вибухових пристроїв, відкриваючи нові можливості для їх застосування у різноманітних галузях [3], [4], [5].

Тому, метою даної роботи є отримання порошків на основі вольфраму відновленням у водні та дослідження їх фізичних і технологічних властивостей.

Матеріали та методи дослідження. На сьогодні, для одержання дисперсних порошків на основі вольфраму застосовують ряд методів: плазмохімічний синтез [6], метод хімічної конденсації [7], [8], метод термолізу карбонілатів [9] і синтезу у водних розчинах [10]. Зазначені, а також інші методи класифіковано у роботі [11]. Перспективними є роботи щодо одержання порошків на основі вольфраму з вольфрамівмісних відходів [12]–[14] або продуктів.

Тому, у роботі в якості вихідних матеріалів використовувалась вольфрамова кислота H_2WO_4 (з розміром частинок 4-6 мкм), оксид міді Cu_2O (з розміром частинок 40 мкм) та гліцерин II сорту.

Для синтезу W-Cu порошків обрано метод, який поєднує двоступінчастий нагрів вихідної суміші в середовищі аргону спочатку до температури 250 оС з витримкою 15 хв, далі нагрів до 500 оС з витримкою 30 хв та подальше відновлення в середовищі водню за температури 700 оС з витримкою 45 хв.

Для вивчення морфології отриманих порошків проводились мікроскопічні дослідження на електронному мікроскопі REM 106II. Методами рентгенофлюорисцентного (на приладі Expert 3L) та мікрорентгено-спектрального (приставка до мікроскопа REM 106II) аналізів було досліджено хімічний склад порошків для встановлення як вмісту основних компонентів, так і домішок.

Для встановлення фазового складу порошків проводився рентгенофазовий аналіз порошків на установці Rigaku Ultima IV.

Для вивчення технологічних властивостей (насипної щільності, щільності утруски, пресуємості) відновлених порошків було використано стандартні методики: насипна щільність та щільність утруски порошку визначалась методом волюмометра Скотта; пресуємість порошків визначалась методом ручного пресування в сталій прес-формі серії пресовок з попередньо пластифікованого порошку за різного тиску пресування (50–500 МПа).

Викладення основного матеріалу.

У роботі вивчались закономірності отримання порошків W-Cu відновленням з вихідних речовин, також було вивчено їх фізичні та технологічні властивості.

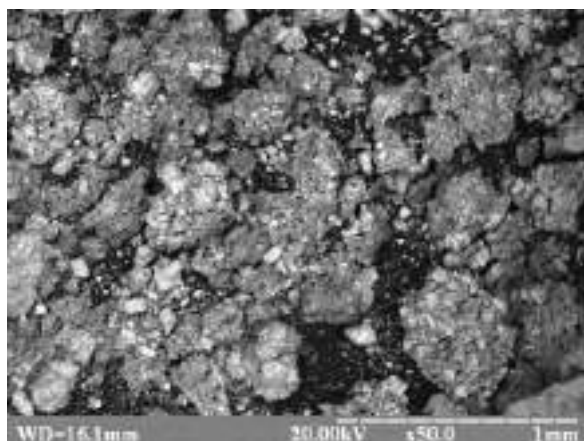
Хімічний склад порошків контролювався як рентгенофлюорисцентним методом (табл.1), так і локальним мікрорентгеноспектральним аналізом (рис.1 в).

Табл. 1.

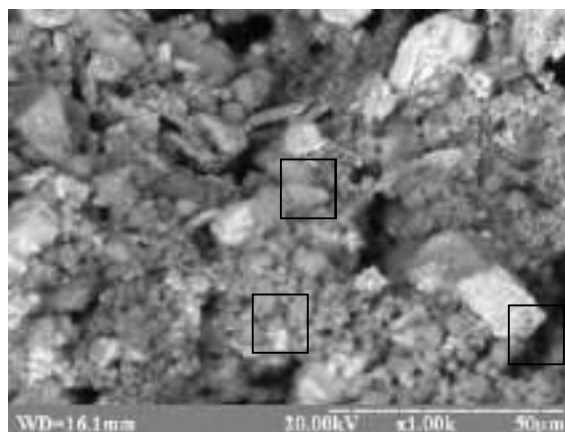
Результати дослідження хімічного складу порошків W-Cu після відновлення

Елемент	Вміст, мас.%
Cu	56,5
W	42,1
Fe	0,11
P	0,67
S	0,58

На рис. 1 зображено морфологію (а) та хімічний склад (б, в) частинок порошку W-Cu, отриманого відновленням в середовищі водню за температури 700 °С з витримкою 45 хв.



а



б

Елемент	Вміст, мас. %		
	Точка 1	Точка 2	Точка 3
Cu	9,41	88,67	15,74
W	84,12	7,7	66,83
O	6,48	3,63	15,74

в

Рис. 1. Морфологія та мікрорентгеноспектральний аналіз відновлених у середовищі водню порошків W-Cu

Для встановлення фазового складу відновлених порошків було проведено рентгенофазовий аналіз (рис.2, табл.2). Встановлено наявність двох фазових складових: вольфраму та міді.

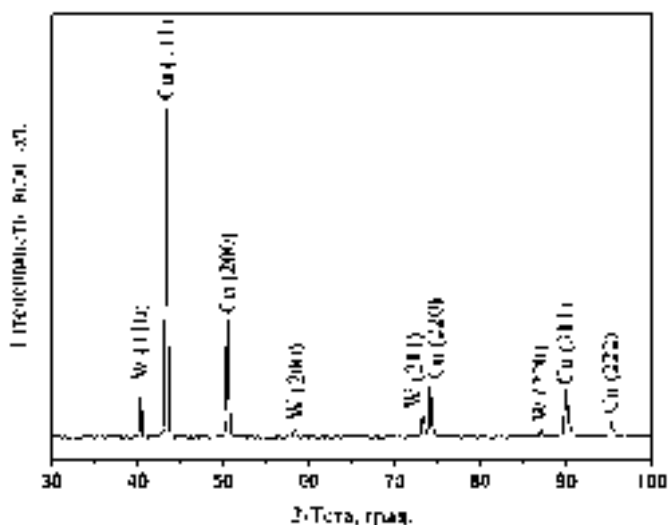


Рис. 2. Рентгенограма відновлених порошків W-Cu

Табл. 2

Результати дослідження фазового складу порошків W-Cu

Фаза	Кількісний вміст фазових складових, %
Cu	75
W	25

Технологічні властивості порошку було визначено методом волюмометра Скотта і встановлено, що для наважки 50 г відновленого порошку W-Cu насипна щільність складає $1,6 \text{ г/см}^3$, а щільність утруски – $2,11 \text{ г/см}^3$. Для визначення пресуємості порошків методом ручного пресування в сталій прес-формі було сформовано серію зразків з попередньо пластифікованого порошку за

різних тисків пресування (50–500 МПа). На основі експериментальних даних встановлено залежність щільності порошкових пресовок від тиску пресування (рис. 3).

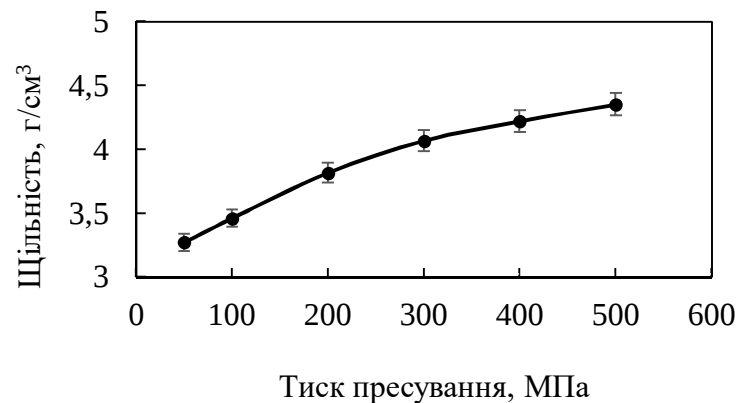


Рис. 3. Графік залежності щільності пресовок з відновлених порошоків W-Cu від тиску пресування

Висновки.

Методом, який поєднує двоступінчастий нагрів вихідної суміші в середовищі аргону та подальше відновлення у середовищі водню протягом 1-1,5 години отримано порошки W-Cu з середнім розміром частинок 30-40 мкм, з насипною щільністю 1,6 г/см³ та щільністю утруски 2,11 г/см³.

Робота виконувалась за фінансової підтримки Міністерства освіти і науки України; номер державної реєстрації 0123U102125.

Список використаних джерел:

- [1] Смірнова Я.О., Лобода П.І., Бісик С.П., Гурія І.М. Дослідження впливу технологій виготовлення кумулятивної лійки на бронепробиття кумулятивного боєприпасу // Труды університету. – 2024. – № 5(187). – С. 219-228.
- [2] Zaki S., Uddin E., Rashid B., Mubashar A., Shah S.R. Effect of liner material and explosive type on penetration effectiveness of shaped charge. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 2019. Vol. 233, № 7. P. 1375–1383. <https://doi.org/10.1177/1464420717753233>
- [3] Wang C., Ma T., Ning J. Experimental investigation of penetration performance of shaped charge into concrete targets. *Acta Mechanica Sinica*. 2008. Vol. 24. P. 345–349. <https://doi.org/10.1007/s10409-008-0160-3>
- [4] Sarana S., Ayisit O., Yavuz M.S. Experimental investigations on aluminum shaped charge liners. *Procedia Engineering*. 2013. Vol. 58. P. 479–486. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.05.055>
- [5] Pyka D., Kurzawa A., Bocian M., Bajkowski M., Magier M., Sliwinski J., Jamroziak K. Numerical and experimental studies of the ŁK type shaped charge. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, № 19. 6742. <https://doi.org/10.3390/app10196742>
- [6] Ryu T., Sohn H. Y., Hwang K. S. *High-Temperature Materials and Processes*, 27: 91. 2008.
- [7] Kim J. C., Kim B. K. *Scr. Mater.*, 50: 969. 2004.
- [8] Su Y., Lin H.-C., Yang T.-K. *Mater. Trans.*, 50, No. 11: 2593. 2009.
- [9] Sahoo P. K., Srinivas S., Kamal K. J. *Mater. Res.*, 26, No. 5: 652. 2011.
- [10] Chen L., Huang Ch., Xu G., Miao L., Shi J., Xiao X., J. *Nanomaterials*, 2012: Article No. 3. 2012.
- [11] Dine S., Aid S., Ouaras K., Malard V., Odorico M., Herlin-Boime N., Habert A., Gerbil-Margueron A., Grisolia Ch., Chêne J., Pieters G., Rousseau B., Vrel D., *Advanced Powder Technology*, 26, No. 5: 1300. 2015.
- [12] Баранов Г. А., Гавриш М. В., Санников Д. Д. Вісник КПІ. *Машинобудування*, № 63: 42. 2011.
- [13] Малишев В. В., Габ А. І. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, 40, № 4: 109. 2004.
- [14] Малишев В. В., Габ А. І. *Металургія: наукові праці Запорізької державної інженерної академії*, Вип. 18: 84. 2008.

А. В. Букетов, В. Ю. Стрельченко

Херсонська державна морська академія

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ В'ЯЗКОСТІ ЕПОКСИДНИХ КОМПОЗИЦІЙ З НАНО- І МІКРОНАПОВНЮВАЧАМИ

У статті досліджено вплив нано- та мікронаповнювачів на динамічну в'язкість епоксидних композитів на основі смоли DER 331. Як наноіаповнювачі використовували вуглецеві нанотрубки (НТ) та наносажу CARBON BLACK N220 за вмісту від 0,01 до 0,1 мас. %, а як мікронаповнювачі – порошки оксиду хрому Cr_2O_3 (20 мкм) та карбїду кремнію SiC (40 мкм) за вмісту від 5 до 20 мас. %. Реологічні дослідження проводили на віскозиметрі NDJ-1S за чотирьох швидкостей зсуву (6, 12, 30, 60 об/хв).

Результати показали, що введення наповнювачів підвищує в'язкість композитів порівняно з чистою смолою, причому мікронаповнювачі мають більший вплив через вищу об'ємну частку. Наносажу суттєвіше підвищує в'язкість епоксидних композицій, ніж НТ, через схильність до агрегації. Усі композиції проявляють псевдопластичні властивості: в'язкість зменшується із зростанням швидкості зсуву. Механізм змін реологічних властивостей пояснено моделлю утворення флокул (для наноіаповнювачів) та гідродинамічною взаємодією часток (для мікронаповнювачів).

Встановлено оптимальний вміст наповнювачів: 0.05 мас. % для наночасток та 10 мас. % для мікрочасток, що може забезпечити покращення механічних властивостей без значного погіршення технологічності. Отримані результати мають важливе значення для розробки технологій нанесення захисних покриттів у суднобудуванні.

Ключові слова: епоксидний композит, динамічна в'язкість, наноіаповнювачі, мікронаповнювачі, реологія, псевдопластичність.

A. V. Buketov, V. Yu. Strelchenko

STUDY OF DYNAMIC VISCOSITY OF EPOXY COMPOSITIONS USING NANO- AND MICRO-FILLERS

The article investigates the effect of nano- and micro-fillers on the dynamic viscosity of epoxy composites based on DER 331 resin. Carbon nanotubes (NT) and CARBON BLACK N220 nanosoot were used as nanofillers at a content of 0.01 to 0.1 mas.%, and chromium oxide Cr_2O_3 powders (20 μm) and silicon carbide SiC (40 μm) at a content of 5 to 20 wt.% as microfillers. Rheological studies were carried out on an NDJ-1S viscometer at four shear rates (6, 12, 30, 60 rpm).

The results showed that the introduction of fillers increases the viscosity of composites compared to pure resin, with microfillers having a greater effect due to their higher volume fraction. Nanofillers significantly increase the viscosity of epoxy compositions than NTs due to their tendency to aggregation. All compositions exhibit pseudoplastic properties: viscosity decreases with increasing shear rate. The mechanism of changes in rheological properties is explained by the model of floc formation and destruction (for nanofillers) and hydrodynamic interaction of particles (for microfillers).

The optimal filler content was established: 0.05 mas.% for nanoparticles and 10 mas.% for microparticles, which can provide an improvement in mechanical properties without significant deterioration in processability. The results obtained are of great importance for the development of technologies for applying protective coatings in shipbuilding.

Keywords: epoxy composite, dynamic viscosity, nanofillers, microfillers, rheology, pseudoplasticity.

Problem statement. It is well known that the introduction of any fillers significantly affects the technological properties of composites, in particular their rheological behavior. Rheological properties, mainly viscosity, are a decisive factor for successful coating by spraying, dipping or casting methods. Too high viscosity makes it difficult to pour compositions into molds, leading to the formation of a poor-quality layer with air bubbles and uneven thickness.

Nanofillers, such as carbon NTs and nanosoot, due to their high specific surface area, are prone to aggregation, which sharply increases the viscosity of a heterogeneous system even at low concentrations. Microfillers (chromium oxide, silicon carbide), on the contrary, are less prone to the formation of structural aggregates and affect the viscosity more predictably, mainly reducing the fluidity of compositions due to the volume effect. Thus, a contradiction arises: on the one hand, fillers are necessary to improve performance characteristics, and on the other hand, they can make the composition unsuitable for practical use. Therefore, a comprehensive study of the rheology of modified compositions is no less important than the study of the mechanical properties of polymerized materials.

Analysis of recent studies and publications. The relevance of such tests is not only in determining the influence of each type of filler separately, but also in further studying the synergistic effect in improving the properties of hybrid systems containing both micro- or nanoparticles and reinforcing fabrics [1-7]. The authors [8-10] proved that at the initial stage it is important to establish the dependence of the dynamic viscosity of epoxy compositions on the type, shape and content of fillers. For this, it was necessary to conduct research to determine the viscosity of epoxy compositions in a wide range of shear rates. As a

© А. В. Букетов, В. Ю. Стрельченко

result, to construct rheological flow curves and analyze deviations from Newtonian behavior in order to further assess the quality of dispersion of additives in the binder and the correlation between aggregation and rheology.

It should be noted that the optimal filler content was taken as the point at which the maximum improvement in mechanical properties is achieved while maintaining an acceptable viscosity for further forming of products or coatings [11, 12]. It was assumed that for nanofillers this point will probably be in the region of the percolation threshold, when a continuous strong network of nanoadditives is formed. For microfillers, the maximum permissible volume fraction at which the system still retains fluidity may be critical. As a result, it is necessary to develop recommendations for the formation of rheologically stable composite systems ready for use in the shipyard.

Therefore, the selection of the optimal content of nano- and microadditives is a key stage in the creation of new effective materials that combine high performance properties with sufficient manufacturability. The results obtained will allow in the future to control the parameters of the formation of hybrid epoxy plastics with sufficient accuracy, guaranteeing their quality and durability. This, in turn, will contribute to increasing the energy efficiency of water transport by reducing hydrodynamic resistance, corrosion protection and increasing anti-cavitation characteristics of materials. Therefore, the analysis of rheological properties is an integral and important part of the comprehensive study of epoxy CMs for marine applications.

The purpose of the work is to establish the patterns of the influence of nano- and microfillers on the dynamic viscosity of epoxy compositions.

Materials and research methods. During the formation of polymer compositions, the epoxy resin DER 331 (ISO 9001) was chosen as the basis, which is the reaction product of epichlorohydrin and bisphenol A. Polyethylene polyamine (TU 2413-357-00203447-99) was used to cure epoxy compositions. As fillers to improve the properties of composites, we used nano- and micro-sized powders. Nanofillers: MWCNT nanotubes and CARBON BLACK PowCarbon N220 nanosoot. Microfillers: chromium oxide (Cr_2O_3) and silicon carbide (SiC) powders with particle sizes of 20 μm and 40 μm , respectively.

To study the rheological properties of epoxy compositions, an NDJ-1S viscometer was used. Four rotor rotation speeds (6, 12, 30, 60 rpm) were selected according to the liquid viscosity measurement range.

Discussion of the results. Fig. 1 shows the dependence of the dynamic viscosity of epoxy compositions based on DER 331 resin on the filler content at different rotor rotation speeds. Based on the graphs presented (Fig. 1, a, c, e, g), the following analysis of the influence of nanofillers on the dynamic viscosity of epoxy compositions can be carried out. The data of rheological studies clearly demonstrate that the introduction of nanoadditives leads to an increase in the dynamic viscosity (η) of the compositions compared to the original epoxy resin (DER 331). This increase is insignificant in absolute figures, but is stably observed at all studied shear rates (6, 12, 30, 60 rpm). For both types of nanofillers (carbon nanotubes (NT) and nanosoot), the dependence of viscosity on their mass fraction (q) in the range up to 0.05 mas.% is nonlinear, which indicates the complexity of the interaction of particles with the oligomeric binder. Nanosoot demonstrates a slightly greater effect on increasing viscosity than carbon nanotubes, which is especially noticeable at higher shear rates (e.g., 60 rpm, Fig. 1, g). This may be due to the larger specific surface area and the tendency of nanosoot particles to form strong spatial aggregates-structures that effectively restrict the movement of polymer chains. Carbon nanotubes, having a sufficiently large aspect ratio, are also prone to the formation of bonds between particles, but their shape probably contributes to lower flow resistance at high shear rates compared to isometric carbon particles.

The curves in all figures show that increasing the rotor speed (shear rate) leads to a significant decrease in dynamic viscosity for all studied compositions. This behavior – a pronounced dependence of viscosity on shear rate – is a characteristic feature of non-Newtonian fluids. Epoxy resin without fillers also demonstrates a decrease in viscosity with increasing shear rate, which confirms its property of shear thinning. However, the introduction of nanofillers enhances this effect of non-Newtonian flow.

The deviation from Newtonian behavior (constant viscosity regardless of shear rate) is a direct consequence of the destruction of the internal structure formed by the filler in the polymer matrix. At low shear rates, the filler aggregates successfully resist the shear (or flow) resistance, creating additional resistance, increasing the viscosity. As the shear rate increases, these aggregates gradually break down and orient themselves in the direction of flow, which reduces resistance and leads to a decrease in viscosity.

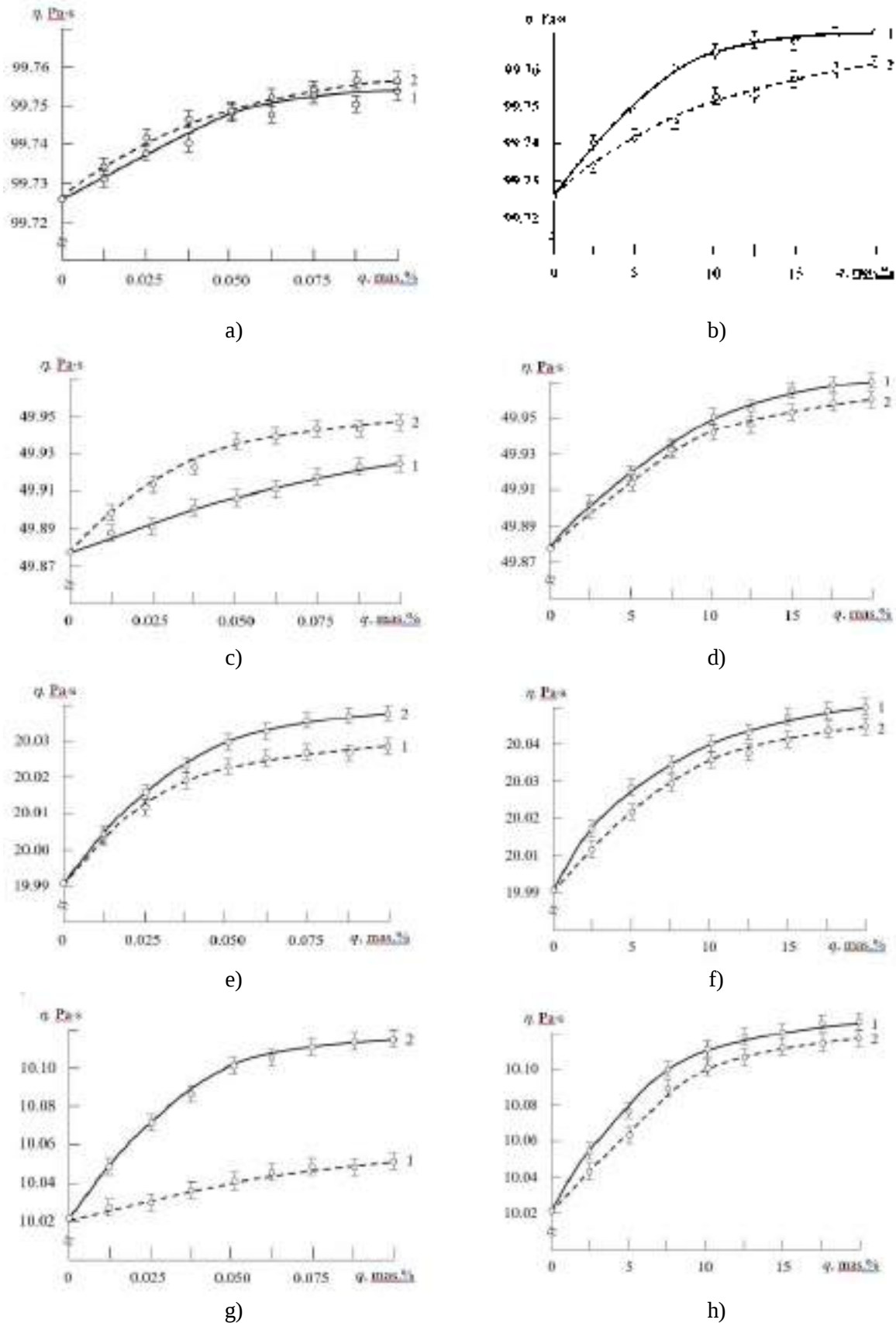


Fig. 1. Dependence of dynamic viscosity (η) on filler content (q) at rotor speed 6 rpm (a, b), 12 rpm (c, d), 30 rpm (e, f), 60 rpm (g, h):
(a, c, e, g) 1 – Nanotubes (NT); 2 – Nanosoot; (b, d, f, h) 1 – Cr₂O₃; 2 – SiC.

The quality of filler dispersion directly affects rheology: better dispersed individual particles have less effect on viscosity, while large aggregates dramatically increase it and enhance non-Newtonian properties. The obtained data indicate that nanocarbon black probably has a higher tendency to aggregation compared to NT, which explains its greater effect on viscosity.

The mechanism of influence of nanofillers on dynamic viscosity can be described by the model of formation and destruction of spatial network (flocules) in a polymer matrix [11]. This model assumes that filler particles, due to their high specific surface area and Van der Waals interactions, form a strong three-dimensional structure. At rest, this structure is maximally strong, limiting the mobility of polymer macromolecules and making the composite quite viscous. When a shear load is applied, this structural network begins to collapse. At a higher shear rate, the destruction of flocs occurs more intensively, which leads to a decrease in the effective volume occupied by the filler. Accordingly, the viscosity of the composition decreases. After removing the load, the network can be restored, which is typical for the systems under study.

The authors [11] noted that flocs (or aggregates) are spatial, three-dimensional clusters of filler particles (in our case, nanotubes or nanosoot particles), united among themselves mainly by physical Van der Waals forces. They are formed spontaneously after the filler is introduced into the polymer. This is not a stable chemical compound, but a dynamic physical structure. The accumulation of particles occurs mainly due to their high specific surface area and energy. It is flocs that are the main reason for the sharp increase in viscosity even with small additions of nanofillers. In this case, polymer chains cannot move freely through this dense network, since they increase the effective volume of the filler particles. The floc includes not only the filler, but also the resin around the particles in the form of soft surface layers. Thus, a composition with 0.05 mas.% filler can behave like a composition with 5 mas.% additive content, creating much greater flow resistance.

Based on the analysis of the graphs (Fig. 1, a, c, e, g), it can be additionally stated that the flocculated structure is not strong. Under the action of shear stresses (rotation of the rotor in our case), these weak bonds between the particles are destroyed. At low shear rates ($V=6$ rpm), the floc structure remains almost intact, therefore the viscosity is maximum. At high shear rates ($V=60$ rpm), the forces that destroy exceed the forces that hold the flocs. The aggregates disintegrate, the particles are oriented along the flow, the effective volume of the filler decreases sharply, and the viscosity decreases. This is a manifestation of the thinning of the compositions during shear (pseudoplasticity). On the contrary, after stopping the experiment, the particles again begin to move randomly (due to Brownian motion), restoring the flocculated network. This ability to recover the structure after the load is removed also implies a change in the thixotropic properties of the materials.

Therefore, the term "floculant" characterizes only dynamic aggregates of nanoparticles that form a temporary three-dimensional network inside the epoxy resin. It is the process of their formation and destruction that is the main mechanism that explains the significant dependence of viscosity on shear rate and its sharp increase even at negligible concentrations of nanofillers.

Based on the analysis of the results obtained, it can be stated that the optimal content for both selected nanofillers should be considered 0.05 mas.%. At this content, a noticeable strengthening of the material is achieved (as can be assumed), but the technological properties (viscosity) remain at an acceptable level, suitable for gluing tissues. A further increase in the particle content will lead to a sharp increase in viscosity and aggregation, which will make the material unsuitable for practical use. It should be noted that for nanocarbon black, due to its greater influence on viscosity, the upper limit of the optimal content may be even lower.

Thus, nanofillers significantly affect the rheology of epoxy composites, enhancing their non-Newtonian behavior due to the formation and destruction of a spatial network of aggregates. Carbon nanotubes have a slightly smaller effect on the increase in viscosity compared to nanocarbon black at the same mass content. The quality of dispersion is a critical factor determining rheological behavior; poor dispersion leads to excessive viscosity increase. The optimal content for both types of nanofillers in this study does not exceed 0.05 mas.%. The results obtained are important for the selection of technological parameters for forming products and preventing problems with their quality.

The work also obtained the dependence of dynamic viscosity (η) on the content of microdispersed fillers at different shear rates. Based on the analysis of Fig. 1, b, d, f, h, the following conclusions can be drawn regarding the influence of microfillers on the dynamic viscosity of epoxy compositions. The introduction of microparticles of chromium oxide (Cr_2O_3) and silicon carbide (SiC) at a content of 10 mas.%

leads to a moderate increase in dynamic viscosity compared to the original resin. This increase is more significant than in the case of nanofillers, which is explained by the higher volume fraction of microparticles. The curves in all graphs demonstrate a clear tendency to decrease in viscosity with increasing rotor rotation speed, which indicates a pronounced non-Newtonian behavior of the composites.

The increase in viscosity with the introduction of microfillers is associated with an increase in the volume content of the dispersed phase and a decrease in the distance between the particles, which limits the mobility of polymer chains. The effect of a decrease in viscosity with an increase in the shear rate is explained by the destruction of temporary structures and the orientation of the particles in the direction of flow. The data indicate that the compositions with microfillers exhibit the properties of pseudoplastic liquids (the viscosity of which decreases with increasing shear rate), which is typical of concentrated suspensions.

A comparison of the effects of the two types of microfillers shows that chromium oxide (20 μm) causes a slightly greater increase in viscosity compared to silicon carbide (40 μm), which may be due to the smaller particle size and larger specific surface area. The deviation from Newtonian behavior confirms the presence of interactions between the filler particles and the formation of temporary structures. The quality of dispersion of microfillers is satisfactory, as evidenced by the smooth nature of the viscosity change and the absence of sharp jumps in the curves.

The mechanism of the influence of microfillers on the rheological properties can be described by the model of concentrated suspensions, where hydrodynamic interactions and random formation of aggregates play a key role [12]. According to this model, filler particles create hydrodynamic fields that interact with each other, which leads to an increase in viscosity even in the absence of direct contact. In concentrated systems, such as compositions with 10 mas.% microfiller, the distance between particles becomes insignificant, which contributes to their additional interaction. Random formation of aggregates (in particular, in the case of chromium oxide) occurs due to the forces of physical interaction, which leads to the formation of temporary structural formations. These structures create additional resistance to flow, which manifests itself as an increase in dynamic viscosity. Under the action of shear stresses, these aggregates are partially destroyed, and the particles are oriented along the flow, which explains the decrease in viscosity with increasing shear rate. The efficiency of this process depends on the size, shape and content of the particles. For example, smaller Cr_2O_3 particles (20 μm) have a larger specific surface area compared to SiC (40 μm), which enhances agglomeration and viscosity increase. The model also predicts that viscosity increases significantly with increasing filler volume content, when particle motion is restricted. This behavior is consistent with experimental data, where the viscosity increase is moderate but significant. Thus, the rheology of microparticle compositions is determined by the balance between hydrodynamic effects and physicochemical interaction of the particles.

The optimal content for microfillers should be considered to be 10 mas.%, since this will provide (in our opinion) a noticeable improvement in mechanical properties without excessively complicating the processing process. Therefore, microfillers slightly increase the viscosity of epoxy compositions, while maintaining the possibility of their further processing by standard methods.

Table 1 systematizes data on the dynamic viscosity of epoxy resin DER 331 and compositions based on it with different fillers at four shear rates (6, 12, 30, 60 rpm). The table data confirm the general trend: an increase in the shear rate leads to a decrease in viscosity for all the studied materials, which is a sign of non-Newtonian behavior (pseudoplasticity). The viscosity of the pure resin decreases from 99.728 Pa·s at 6 rpm to 10.021 Pa·s at 60 rpm, which demonstrates its shear thinning property. The introduction of nanofillers (0.05 mas.%) increases the viscosity compared to the pure resin at all shear rates.

Table 1

Viscosity of epoxy compositions with optimal content of nano- and microfillers					
Rotation speed, V, rpm	Viscosity of compositions, Pa·s				
	Resin DER 331	NT (0.05%)	Nanosoot (0.05%)	Cr_2O_3 (20 μm) (10%)	SiC (40 μm) (10%)
6	99.728	99.747	99.749	99.765	99.749
12	49.875	49.899	49.932	49.946	49.941
30	19.991	20.020	20.030	20.039	20.036
60	10.021	10.038	10.102	10.115	10.109

Nanosoot has a greater effect on viscosity than carbon nanotubes (CNTs). For example, at 60 rpm, the viscosity of the composite with nanosoot (10.102 Pa·s) is higher than with CNTs (10.038 Pa·s). Microfillers (10 mas.%) cause a significantly greater absolute increase in viscosity compared to nanofillers due to their higher volume fraction. Chromium oxide (Cr_2O_3) shows a slightly greater effect on viscosity than silicon carbide (SiC), which is explained by the smaller particle size (20 μm versus 40 μm) and, accordingly, the larger specific surface area. For example, at 6 rpm, the viscosity is 99.765 Pa·s for Cr_2O_3 versus 99.749 Pa·s for SiC.

The relative increase in viscosity due to the introduction of additives is more significant at low shear rates (6 rpm) and decreases at high (60 rpm), which confirms the destruction of aggregates of filler particles under the action of shear forces. The difference in viscosity between the compositions and the pure resin also decreases with increasing shear rate, which indicates the leveling of rheological properties under conditions of intense loading. The obtained data are of important technological importance for coating processes requiring high speeds (e.g. spraying), the viscosity of different composites will be close, which simplifies their application. However, for low shear rate coating methods (e.g. vacuum infusion), the choice of filler type and content will critically affect the processability of the material.

Conclusions. Based on the above, it can be stated that the rheological properties of epoxy compositions significantly depend on the type, size and content of the filler, as well as on the technological conditions of product formation (shear rate). Nanofillers (0.05 mas.%) moderately increase the viscosity, and nanocarbon black has a more significant effect due to its tendency to aggregation. Microfillers (10 mas.%) cause a significantly greater absolute increase in viscosity, and smaller particles (Cr_2O_3 , 20 μm) increase it more than larger ones (SiC, 40 μm).

All compositions exhibit pseudoplastic properties, which makes them convenient for creating compositions for the purpose of further forming hybrid composites: they reduce flow resistance during application and retain their shape after its termination.

The optimal filler content was established: 0.05 mas.% for nanoparticles and 10 mas.% for microparticles, since with such a filling it is possible to achieve a useful strengthening effect without a sharp deterioration in technological properties. The results obtained are the basis for the development of technological regulations for applying high-quality protective coatings and forming hybrid composites for water transport. The study confirms that rheological control is a key tool for optimizing both operational and technological properties of composite materials. By selecting the type and content of the filler, it is possible to purposefully control the rheology of epoxy compositions to ensure their effective use in shipbuilding.

List of sources used

1. Yan, L., Chouw, N., Jayaraman, K.: Flax fibre and its composites – A review. *Composites Part B: Engineering*. 56, 296–317 (2014).
2. Chandrasekaran, S., Seidel, C., Schulte, K.: Preparation and characterization of graphite nanoplatelet (GNP)/epoxy nano-composite: Mechanical, electrical and thermal properties. *European Polymer Journal*. 49 (12), 3878–3888 (2013).
3. Shaffer, E.O., McGarry, F.J., Hoang, Lan: Designing reliable polymer coatings. *Polymer Engineering & Science*. 36 (18), 2375–2381 (1996).
4. Rubino, F., Nisticò, A., Tucci, F., Carlone, P.: Marine Application of Fiber Reinforced Composites: A Review. *Journal of Marine Science and Engineering*. 8 (1): 26 (2020).
5. La Mantia, F.P., Morreale, M.: Green composites: A brief review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 42(6), 579–588 (2011).
6. Greene, E.: Marine composites and IMO fire safety requirements. In: *Marine Composites* (2nd ed.), pp. 437–458. Butterworth-Heinemann (2019).
7. Mallick, P.K.: *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design*. 3rd ed. CRC Press (2007).
8. Pascault, J.-P., Williams, R.J.J.: *Epoxy Polymers: New Materials and Innovations*. Wiley-VCH (2010).
9. Friedrich, K., Almajid, A.A.: Manufacturing Aspects of Advanced Polymer Composites for Automotive Applications. *Applied Composite Materials*. 20(2), 107–128 (2012).
10. Chawla, K.K.: *Composite Materials: Science and Engineering*. 3rd ed. Springer (2012).
11. Mewis, J., Wagner, N.J.: *Colloidal Suspension Rheology*. Cambridge University Press (2012).
12. Hoffman, R.L.: Explanations for the cause of shear thickening in concentrated colloidal suspensions. *Journal of Rheology*, 42 (1), 111–123 (1998).

В. Ю. Кондусь

Сумський державний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВІЛЬНОВИХРОВИХ НАСОСІВ ПРИ РОБОТІ У РОБОЧОМУ ДІАПАЗОНІ $Q = 0,7-1,2 Q_{\text{ном}}$

У роботі виконано чисельне дослідження робочих характеристик вільновихрового насоса СВН 80-32 у діапазоні подач $Q = 0,7-1,2 \cdot Q_{\text{ном}}$, що відповідає типовим умовам тривалої експлуатації насосного обладнання. На основі геометричних параметрів насоса побудовано тривимірні моделі та проведено CFD-аналіз у середовищі ANSYS CFX із застосуванням $k-\epsilon$ моделі турбулентності. Розглянуто два варіанти робочих коліс: з шістьма криволінійними лопатями та двоярусне колесо з дванадцятьма лопатями.

Отримані характеристики показали, що у робочому діапазоні обидва виконання забезпечують стабільний положоспадний характер напірної кривої та близькі значення гідравлічного ККД (до 48,3% для шестилопатевого та 47,5% для двоярусного колеса). Водночас двоярусна система забезпечує приріст напору на 1,3–1,8 м (3–5%) без суттєвого зниження енергоефективності. Аналіз швидкісних і тискових полів показав, що двоярусне колесо формує більш рівномірне натікання на лопаті, зменшує дифузорність каналів та знижує вихрові втрати у вільній камері.

Результати дослідження дозволяють обґрунтувати вибір конструкції робочого колеса залежно від умов експлуатації: шестилопатеве виконання є більш доцільним у режимах, близьких до номінального, тоді як двоярусне забезпечує додатковий запас напору та кращу стабільність роботи у зонах підвищених подач.

Ключові слова: вільновихровий насос; гідравлічні характеристики; CFD-аналіз; робочий діапазон подач; робоче колесо; двоярусна лопатева система; гідравлічний ККД; статичний тиск; швидкісні поля; енергетична ефективність.

V. Kondus

INVESTIGATION OF THE OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF TORQUE-FLOW PUMPS WITHIN THE OPERATING RANGE $Q = 0.7-1.2 Q_{\text{nom}}$

This study presents a numerical investigation of the operational characteristics of the torque-flow pump TFP 80-32 within the flow rate range $Q = 0.7-1.2 \cdot Q_{\text{nom}}$, which corresponds to typical conditions of long-term pump operation. Based on the geometric parameters of the pump, three-dimensional models were developed and a CFD analysis was carried out in ANSYS CFX using the $k-\epsilon$ turbulence model. Two types of impellers were considered: one with six curvilinear blades and a dual-tier impeller with twelve blades.

The obtained characteristics demonstrated that, within the operating range, both designs provide a stable, gently declining head curve and comparable hydraulic efficiency values (up to 48.3% for the six-blade impeller and 47.5% for the dual-tier impeller). At the same time, the dual-tier configuration ensures an increase in head by 1.3–1.8 m (3–5%) without a significant decrease in energy efficiency. Analysis of velocity and pressure fields showed that the dual-tier impeller provides more uniform flow distribution onto the blades, reduces channel diffusivity, and decreases vortex losses in the free chamber.

The results of the study justify the choice of impeller design depending on the operating conditions: the six-blade impeller is more suitable for regimes close to the nominal point, while the dual-tier impeller ensures an additional head margin and greater operational stability at higher flow rates.

Keywords: torque-flow pump; hydraulic characteristics; CFD analysis; operating flow range; impeller; dual-tier blade system; hydraulic efficiency; static pressure; velocity fields; energy efficiency.

1. Introduction

Torque-flow pumps have found wide application in industry and municipal utilities due to their ability to transport liquids containing solid and fibrous inclusions, as well as gas-liquid mixtures [1]. Their design features – simplified flow passage, presence of a free chamber, and minimal contact between the operating medium and the impeller – provide high reliability and resistance to clogging [2]. This makes torque-flow pumps competitive in cases where the operation of centrifugal counterparts is complicated.

At the same time, a key drawback of this pump type remains its relatively low efficiency (mainly 0.35–0.55) and limited head values. Therefore, selecting the optimal operating mode becomes crucial to ensure maximum efficiency under permissible operating conditions [3].

The nominal operating mode of a pump is generally determined by factory-specified values of flow rate and head. However, in real operating conditions, pumps most often operate in the range of 70 to 120% of the nominal flow rate [4]. This zone of operation is decisive for both the reliability of the equipment and the overall economy of the pumping process [5]. The insufficient amount of experimental data regarding the behavior of torque-flow pumps within the operating range $Q = 0.7-1.2 \cdot Q_{\text{ном}}$ highlights the need for targeted investigations [6].

For ensuring stable and high-quality operation of pumping equipment, it is not enough to know the characteristics only at the optimal or nominal point. In practice, it is important to analyze pump behavior over a wider operating interval, where actual conditions often deviate from the rated parameters. It is within

$Q = 0.7-1.2 \cdot Q_{\text{nom}}$ that most pumping regimes occur, determining their influence on the system's energy efficiency, reliability, and durability [7].



Fig. 1. Structural design of a typical torque-flow pump of the TFP type

The study of characteristics within this range makes it possible to identify not only the location of the maximum efficiency point but also the width of the operating zone where the pump maintains satisfactory hydraulic and energy performance. Such data are crucial for the selection of the drive motor, adjustment of control modes, and minimization of risks of overload or instability during operation [8].

Thus, the relevance of this work lies in modeling the head and energy characteristics of torque-flow pumps specifically within the operating flow range, which will refine recommendations for their application and provide a foundation for further optimization of their designs.

2. Literature review and formulation of the research problem.

Torque-flow pumps are considered in modern studies as an effective solution for pumping liquids with a high content of solid particles, fibrous inclusions, and gas admixtures [9, 10]. Due to their structural simplicity and reduced probability of clogging, they are widely used in municipal utilities, as well as in the food, chemical, and energy industries [11].

In recent years, researchers have focused on improving the flow passage and operating elements, which makes it possible to enhance the energy efficiency of such pumps [12]. In works [13, 14], new methods for designing impellers with a curvilinear blade profile and combined channels have been proposed, providing a reduction of hydraulic losses [15]. Both numerical simulations and experimental investigations of pump characteristics have been carried out, including the influence of design parameters on efficiency and head curves [16].

At the same time, most scientific works have focused on the optimization of operating elements or the analysis of hydrodynamic processes across a wide range of flow rates, including extreme regimes ($0.2-0.4 \cdot Q_{\text{nom}}$ and above $1.3 \cdot Q_{\text{nom}}$) [17]. Much less attention has been paid to the systematic study of characteristics specifically within the operating interval $Q = 0.7-1.2 \cdot Q_{\text{nom}}$, which is the most typical for long-term operation of pumping equipment [18].

Thus, the available literature confirms the importance of investigating torque-flow pumps but reveals a scientific gap associated with the insufficient amount of experimental data in the zone of real operating flow rates. Filling this gap will make it possible to more accurately determine the position of the maximum efficiency point, the width of the operating range, and the conditions for stable pump operation.

3. The aim and objectives of the research.

The aim of this work is to conduct a numerical investigation of the hydraulic and energy characteristics of torque-flow pumps within the operating flow range $Q = 0.7-1.2 \cdot Q_{\text{nom}}$ in order to refine the optimal conditions for their operation.

To achieve this goal, the following tasks were set:

1. To construct a three-dimensional model of the flow passage of the torque-flow pump.
2. To perform CFD simulations of pump operation at different flow rates within the range $Q = 0.7-1.2 \cdot Q_{\text{nom}}$.

3. To determine the “head–flow rate” and “efficiency–flow rate” dependencies based on numerical results.
4. To identify the position of the maximum efficiency point and evaluate its deviation relative to the nominal flow rate.
5. To assess the width of the operating zone where the pump maintains satisfactory performance and to define its behavior outside the optimal regime.
6. To formulate practical recommendations for applying the results of numerical modeling in the further optimization of pump designs and their operation.

4. Research Methodology.

The initial data for modeling were the geometric parameters of the TFP 80-32 pump. Based on these, three-dimensional solid models of the impeller and the flow passage of the casing were created in SolidWorks (Fig. 2). Separate models were developed for the single-tier and double-tier impellers.

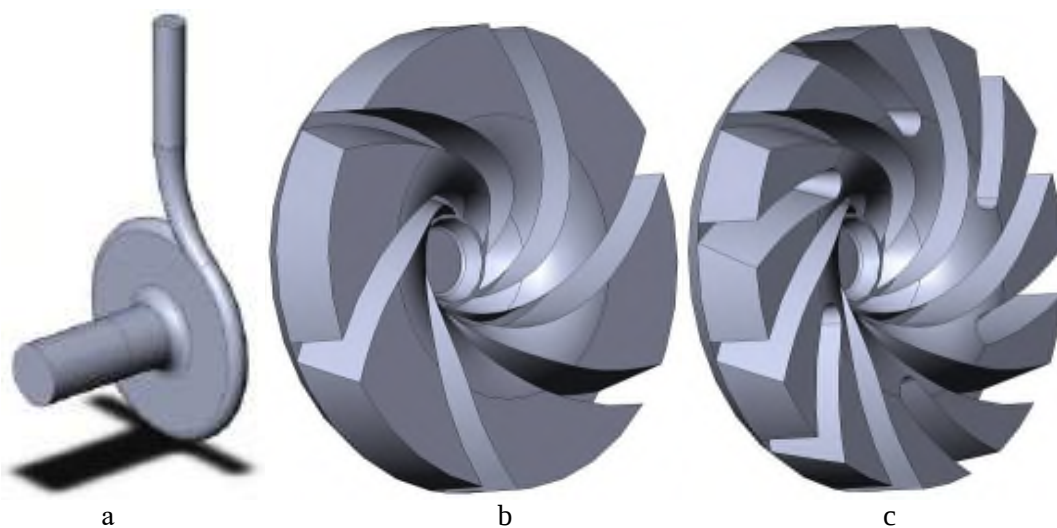


Fig. 2. Models of the TFP 80-32 pump components (in SolidWorks):
a – stator element of the casing; b – rotor element with a single-tier impeller;
c – rotor element with a double-tier impeller

The preparation of the computational domains was carried out in ANSYS ICEM CFD [19], where the stator (casing) and rotor (impeller) zones were generated independently. For each zone, an unstructured mesh with local refinement near the walls in the form of prismatic layers was created (Fig. 3). The total number of elements was about 1.45 million for the single-tier impeller model and up to 1.75 million for the double-tier model (Fig. 3b,c), ensuring a balance between accuracy and computational cost. The minimum mesh quality did not drop below 0.35–0.37.

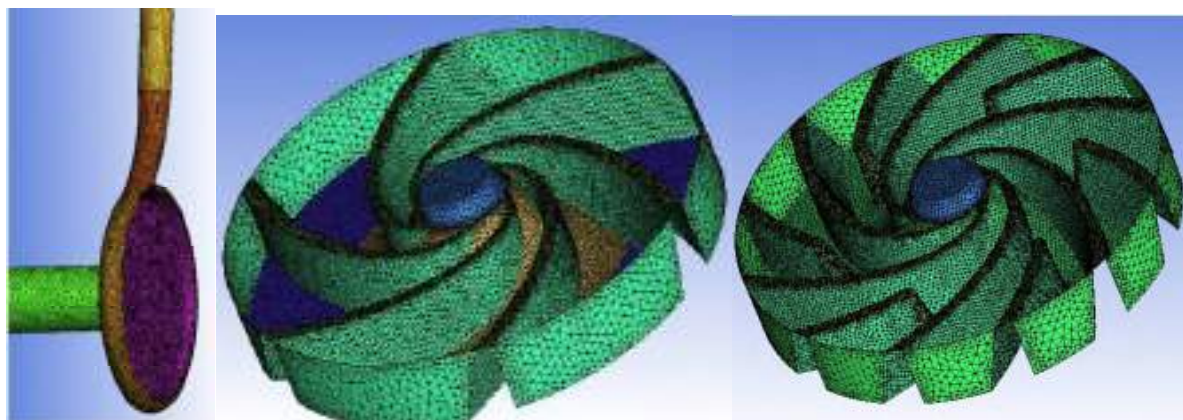


Fig.3. Structure of the generated computational meshes:
a – stator element of the casing; b – rotor element with a single-tier impeller; c – rotor element with a double-tier impeller

The meshes were then exported into ANSYS CFX-Pre, where the boundary conditions were specified (Fig. 4). At the inlet, a constant mass flow rate was defined, while at the outlet, a static pressure of 0.4 MPa was imposed. The simulations were carried out in a steady-state formulation using the $k-\varepsilon$ turbulence model, which is a widely accepted approach for describing flows in torque-flow pumps. The interaction between rotor and stator domains was modeled using Frozen Rotor and Stage interfaces.

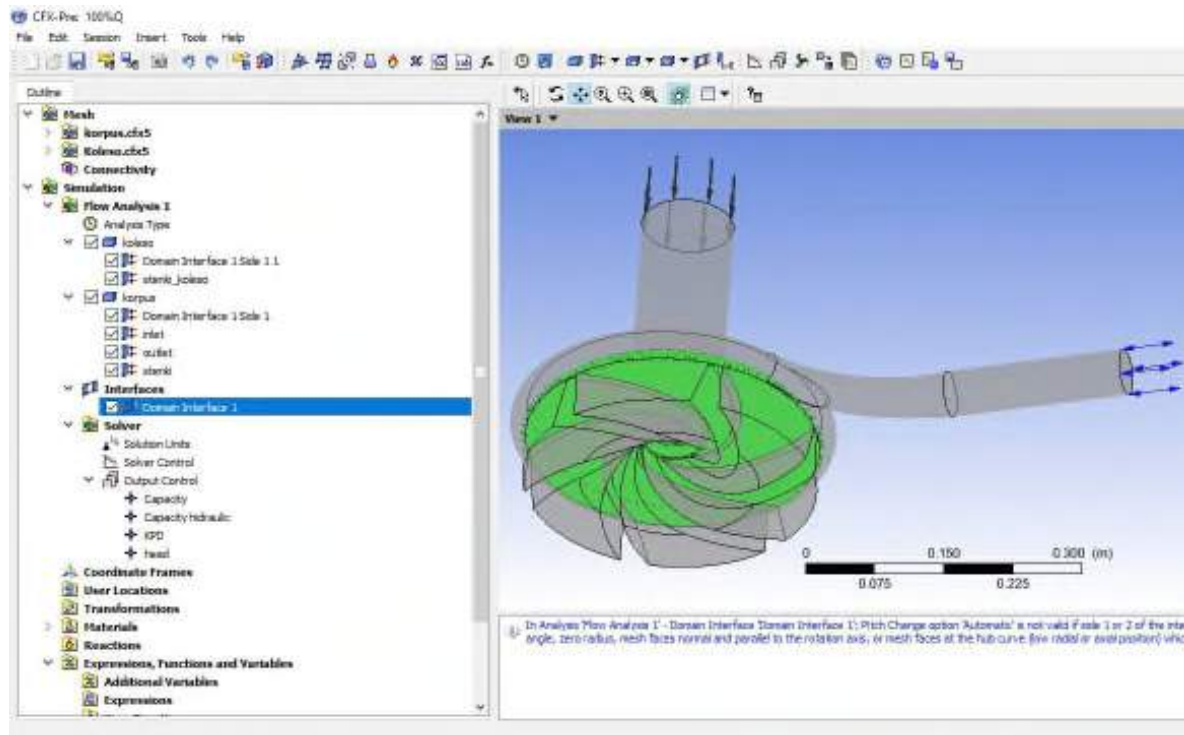


Fig. 4. Boundary conditions applied in ANSYS CFX-Pre

The study was conducted within the operating flow range $Q = 0.7\text{--}1.2 \cdot Q_{\text{nom}}$, which corresponds to practical long-term operating conditions of pumps [20, 21]. For the nominal flow rate ($Q = Q_{\text{nom}} = 80 \text{ m}^3/\text{h}$, approximately 22.2 kg/s), baseline calculations were performed, while for other flow rates the mass flow was adjusted according to proportional relations. The surface roughness of the flow passage was set to $100 \text{ }\mu\text{m}$, corresponding to cast surfaces of the components.

The convergence criteria were defined as achieving a root-mean-square deviation of mass balance and torque not exceeding 10^{-4} . Additionally, head, hydraulic power, input power, and efficiency were monitored throughout the simulations.

5. Research Results.

The developed computational models and the adopted simulation parameters made it possible to perform a series of numerical studies in the operating flow range $Q = 0.7\text{--}1.2 \cdot Q_{\text{nom}}$. As a result, the main hydraulic and energy performance indicators of the pump were determined [22, 23], including the “head–flow” and “efficiency–flow” dependencies, as well as the position of the maximum efficiency point for two designs of the TFP 80-32 pump (Fig. 5): with a six-curved-blade impeller (blue line) and with a double-tier impeller of twelve blades (red line).

The modeling results and their analysis are presented below.

Numerical simulations (Fig. 5) showed that for both impeller configurations, the pump maintains stable head–flow curves and similar efficiency profiles. According to API 610, pumps are allowed to operate short-term within $70\text{--}120\% Q_{\text{nom}}$ and long-term within $90\text{--}110\% Q_{\text{nom}}$. For the studied pump, this corresponds to flow ranges of $56\text{--}96 \text{ m}^3/\text{h}$ (short-term) and $72\text{--}88 \text{ m}^3/\text{h}$ (long-term).

The results indicate that the use of the double-tier impeller increases the head by 1.3 m ($\approx 3.4\%$) at the best efficiency point (BEP), while the hydraulic and overall efficiency remain nearly identical between both configurations. This confirms the feasibility of using the improved impeller to boost head without reducing efficiency.

In the operating flow range $Q = 0.7\text{--}1.2 \cdot Q_{\text{nom}}$, the head curve maintains a stable, gradually decreasing trend. At low flow rates ($<0.5 \cdot Q_{\text{nom}}$), a head “dip” is observed, which may cause flow instability; however, operation in this zone is not permitted by the standard.

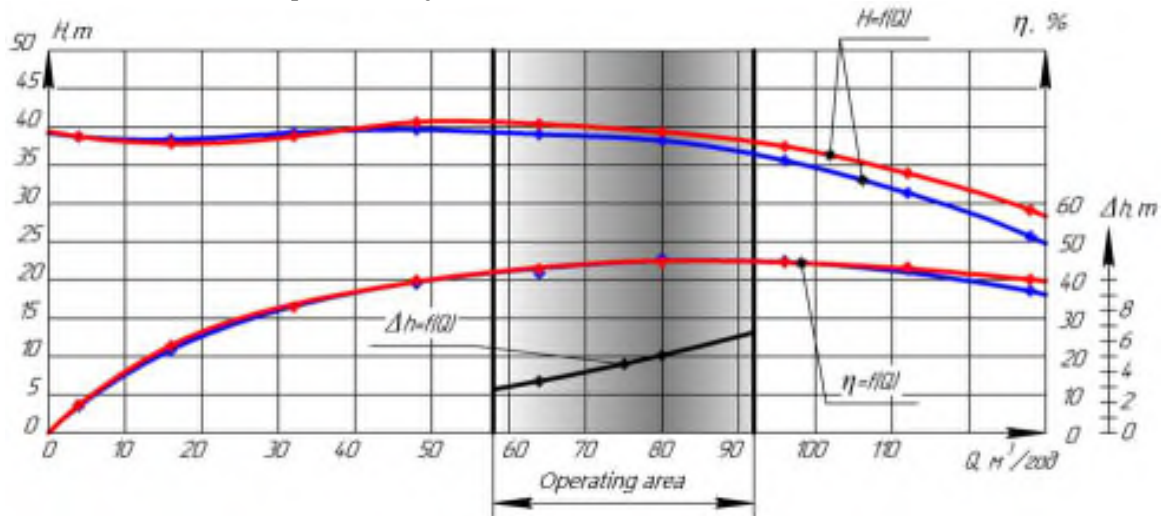


Fig. 5. Characteristics of the TFP 80-32 pump with a six-curved-blade impeller (blue line) and a double-tier impeller with twelve blades (red line) in the operating range $Q = 0.7\text{--}1.2 \cdot Q_{\text{nom}}$.

At the nominal flow ($Q = Q_{\text{nom}} = 80 \text{ m}^3/\text{h}$), the hydraulic efficiency reached 48.3% for the six-blade impeller and 47.5% for the double-tier impeller. The corresponding overall efficiency values were 45.5% and 44.6%. The difference between variants did not exceed the numerical error margin.

Tables 1 and 2 summarize the working parameters of the SVH 80-32 pump with both impeller configurations in the operating range.

Table 1.

Operating parameters of TFP 80-32 pump with six-blade impeller

Flow rate, % Q_{nom}	60	70	80	90	100	110	120
Flow rate, m^3/h	48	56	64	72	80	88	96
Head, m	39.63	39.33	39.02	38.62	38.21	36.91	35.61
Hydraulic power, W	5184	6001	6805	7576	8330	8851	9316
Input power, W	12521	14005	15361	16363	17246	18440	19530
Hydraulic efficiency	0.414	0.429	0.443	0.463	0.483	0.480	0.477
Overall efficiency	0.39	0.404	0.417	0.436	0.455	0.452	0.449

Table 2.

Operating parameters of TFP 80-32 pump with double-tier impeller

Flow rate, % Q_{nom}	60	70	80	90	100	110	120
Flow rate, m^3/h	48	56	64	72	80	88	96
Head, m	40.59	40.48	40.37	39.86	39.34	38.40	37.45
Hydraulic power, W	5309	6177	7041	7820	8576	9207	9797
Input power, W	12522	14055	15474	16816	18055	19404	20669
Hydraulic efficiency	0.424	0.440	0.455	0.465	0.475	0.475	0.474
Overall efficiency	0.399	0.414	0.428	0.438	0.447	0.447	0.446

A comparison of results showed that the double-tier impeller consistently increases head (by 3–5% within $Q = 0.7\text{--}1.2 \cdot Q_{\text{nom}}$) while maintaining nearly the same hydraulic and overall efficiencies. Meanwhile, the six-blade impeller has a slight advantage in peak efficiency (by up to 1%) at the nominal flow.

For operation in reduced flow zones ($0.8\text{--}0.9 \cdot Q_{\text{nom}}$), or where an additional head margin is required, the double-tier impeller is more advantageous. It provides a wider efficiency “plateau” and smoother head

reduction at high flow rates, positively affecting system stability. If maximum energy efficiency at nominal flow is the priority, the six-blade design is preferable.

The maximum efficiency values reached about $\eta_{hyd} = 0.48\text{--}0.49$ and $\eta_{tot} = 0.45\text{--}0.46$. The difference between the two designs did not exceed 0.5–1%, within the bounds of numerical accuracy. In the range of 90–110% Q_{nom} , the efficiency remained at least 95% of the peak, which defines the optimal long-term operating zone.

Thus, the double-tier impeller increases pump head without noticeable efficiency losses, making it preferable when additional head margin and stable energy performance are required. The choice of impeller type should therefore be based on operating conditions: the double-tier design suits variable flow regimes and high-head applications, while the six-blade impeller is better for stable operation near the nominal point.

Flow fields analysis.

Figure 6 presents the results of numerical simulation of the absolute velocity distribution in the flow passage and the central cross-section of the TFP 80-32 pump for two impeller configurations: with six blades and with a double-tier system of twelve blades. In both cases, the velocity fields exhibit a similar pattern, indicating the absence of significant differences in the overall flow structure.

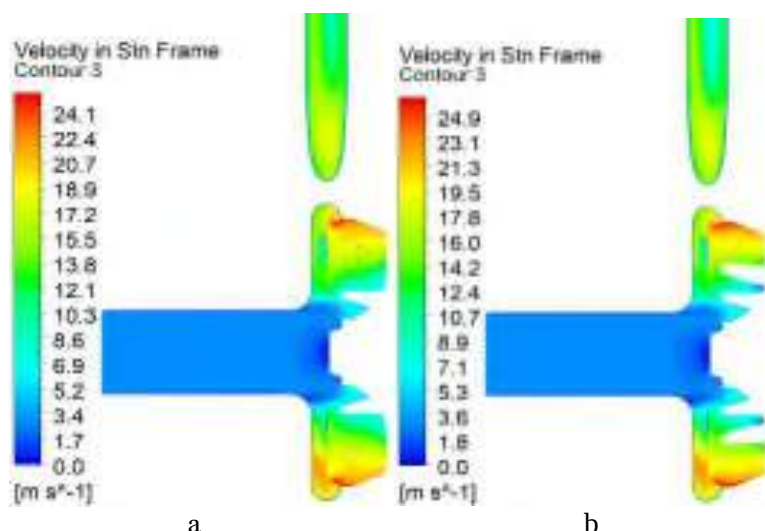


Fig. 6. Absolute velocity distribution in the central cross-section of the TFP 80-32 pump: a – with a six-blade impeller; b – with a double-tier impeller system.

A similar picture is observed for the static pressure distribution (Fig. 7): in the central cross-section of the pump, the flow trajectories are practically identical. This suggests that, for qualitative analysis, it is sufficient to examine selected cross-sections, focusing on key differences in the inter-blade channel zone.

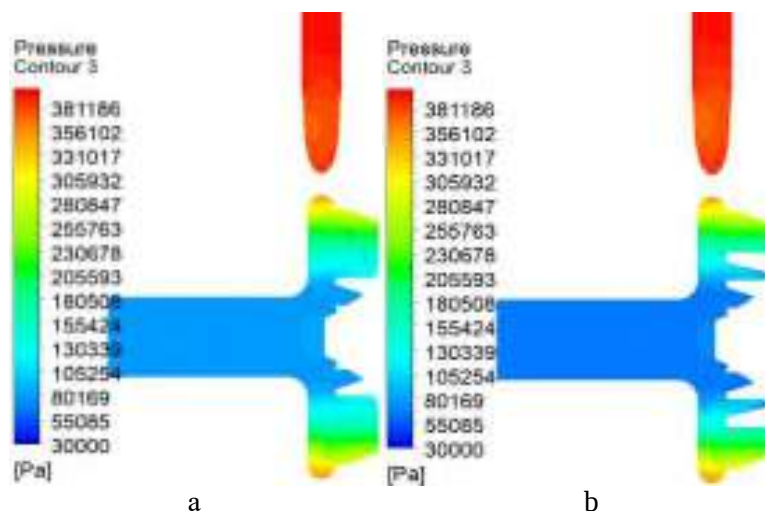


Fig. 7. Static pressure distribution in the central cross-section of the SVH 80-32 pump: a – with a six-blade impeller; b – with a double-tier impeller system

Operating Mode $Q = Q_{\text{nom}}$ (80 m³/h).

Figures 8–10 show the distribution of relative velocity in the impeller flow channels (at the leading edge, in the central part, and near the disk) under the nominal operating mode ($Q = Q_{\text{nom}}$). For the six-blade impeller, excessive channel diffusivity is observed, leading to non-uniform flow incidence (areas of reduced velocity are highlighted in blue). In the case of the double-tier system, the flow formation is smoother and more uniform, which reduces losses and improves blade incidence.

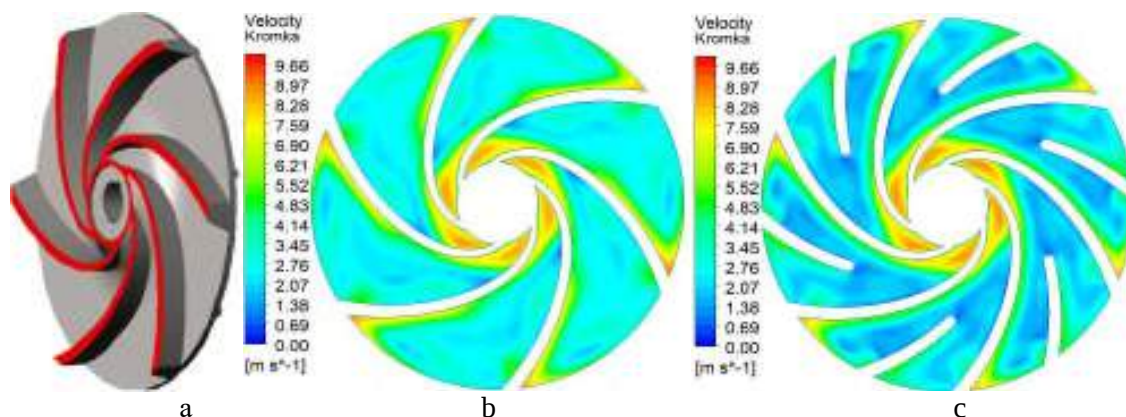


Fig. 8. Distribution of relative velocity in the impeller flow channels at the leading edge ($Q = Q_{\text{nom}}$): a – cross-section location; b – six-blade impeller; c – double-tier impeller system

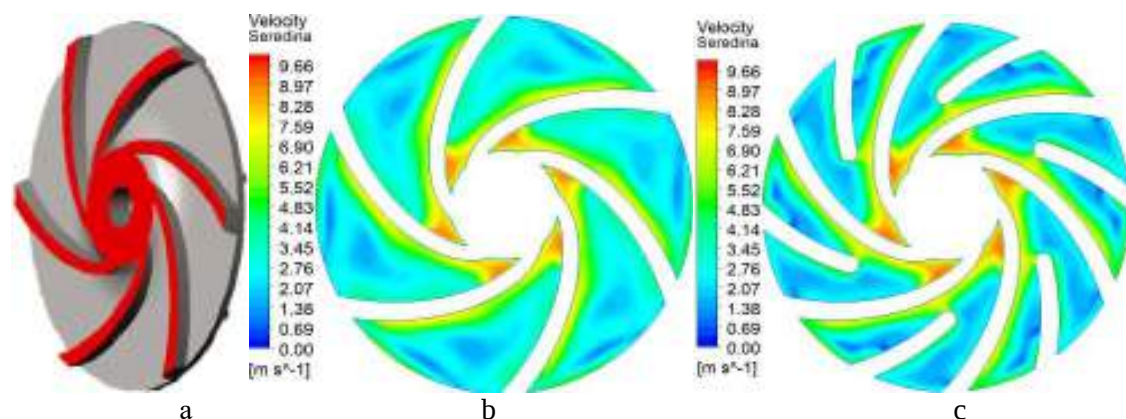


Fig. 9. Distribution of relative velocity in the impeller flow channels at the midspan ($Q = Q_{\text{nom}}$): a – cross-section location; b – six-blade impeller; c – double-tier impeller system

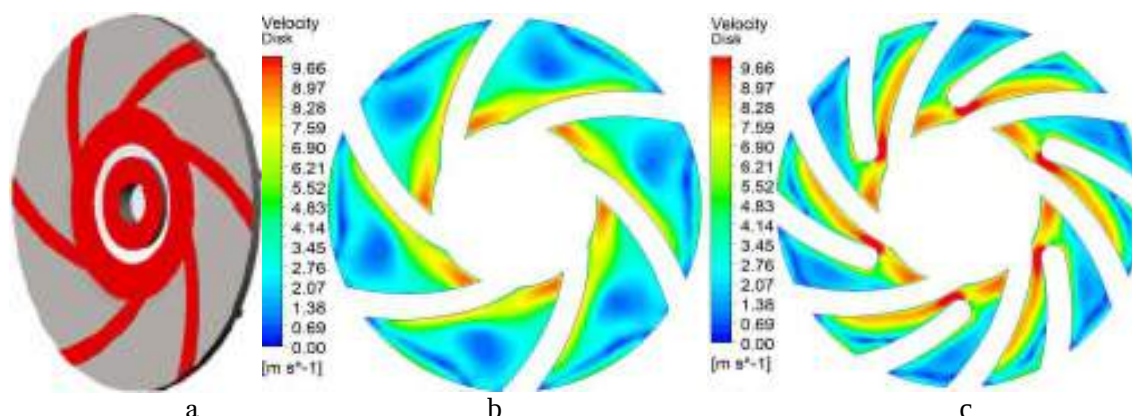


Fig. 10. Distribution of relative velocity in the impeller flow channels near the disk ($Q = Q_{\text{nom}}$): a – cross-section location; b – six-blade impeller; c – double-tier impeller system

It should be noted that the use of an impeller with a large number of primary blades (without tier division) would lead to grid thickening near the hub, an increase in hydraulic resistance at the inlet, and intensification of vortex losses, which would negatively affect efficiency. The double-tier design helps to avoid this effect, while ensuring a more uniform distribution of velocities in the inter-blade channels.

Operating Mode $Q = 0.7 \cdot Q_{nom}$ (56 m³/h)

Figures 11–13 present the results of numerical simulations of the relative velocity distribution in the impeller flow channels of the SVHN 80-32 pump at $Q = 0.7 \cdot Q_{nom}$. The analysis was performed for three characteristic zones: at the blade leading edge, in the midspan of the channel, and near the impeller disk.

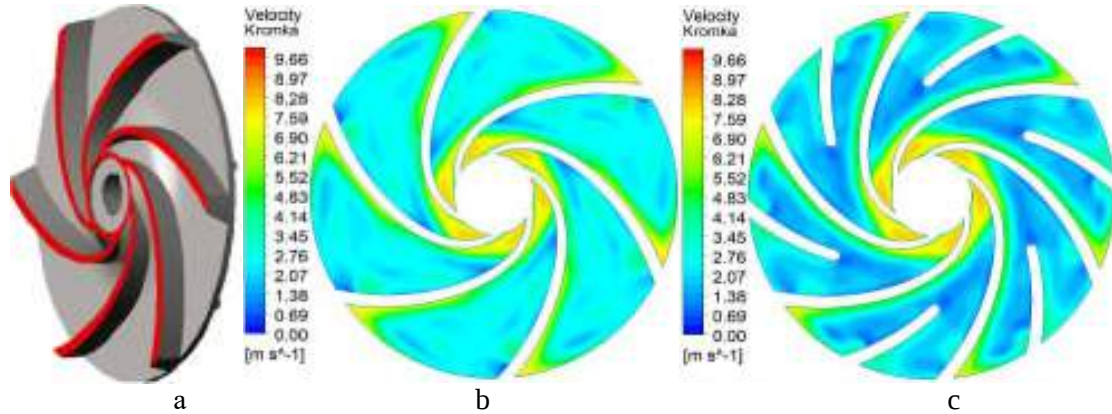


Fig. 11. Distribution of relative velocity in the impeller flow channels at the leading edge ($Q = 0.7 \cdot Q_{nom}$): a – cross-section location; b – six-blade impeller; c – double-tier impeller system

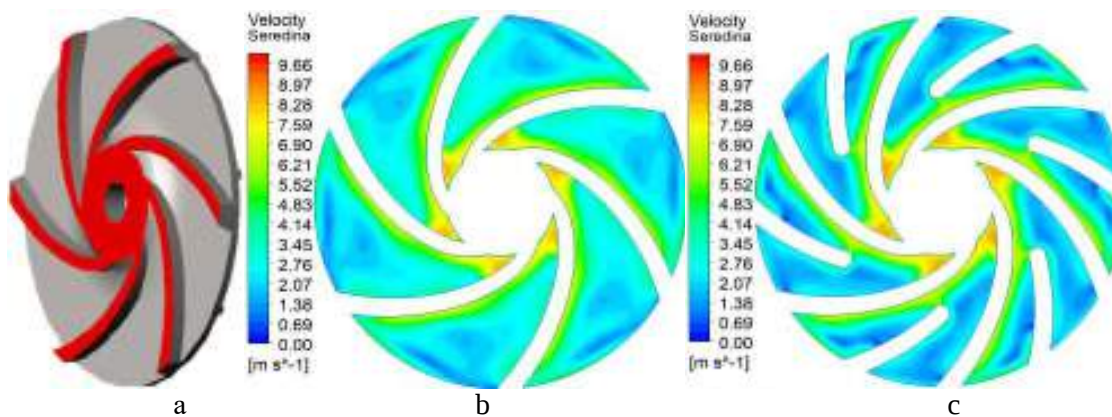


Fig. 12. Distribution of relative velocity in the impeller flow channels at the midspan ($Q = 0.7 \cdot Q_{nom}$): a – cross-section location; b – six-blade impeller; c – double-tier impeller system

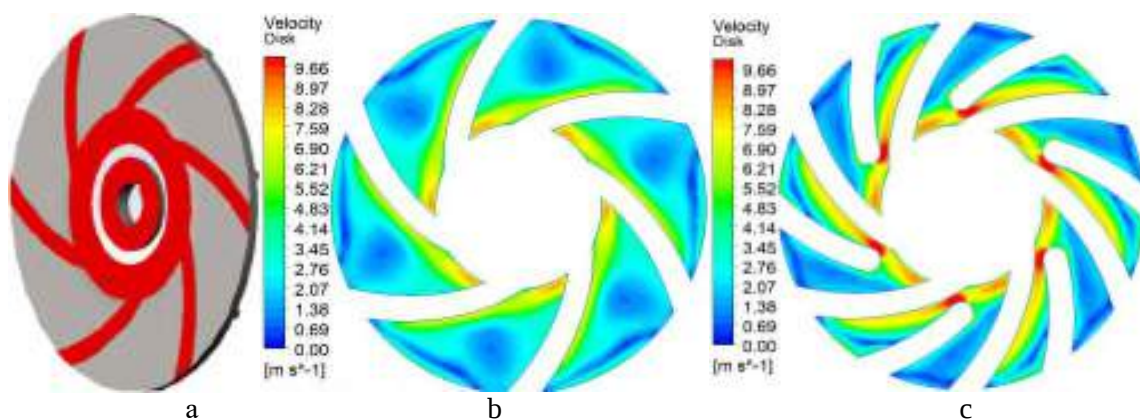


Fig. 13. Distribution of relative velocity in the impeller flow channels near the disk ($Q = 0.7 \cdot Q_{nom}$): a – cross-section location; b – six-blade impeller; c – double-tier impeller system

For the baseline six-blade design, noticeable channel diffusivity is observed, which results in zones of reduced velocity near the walls. This indicates less uniform flow incidence and can cause local hydraulic losses. In the case of the double-tier system, the velocity distribution is more uniform: the inlet flow passes over the blades more smoothly, while the velocity fields at the midspan and near the disk exhibit a more symmetrical pattern.

A comparison with the nominal flow rate mode ($Q = Q_{\text{nom}}$) shows that the overall flow structure in the inter-blade channels remains similar. However, in the low-flow zone, the advantage of the double-tier impeller becomes more evident: due to lower diffusivity and a higher number of channels, the area of stagnant zones is reduced, which positively influences pump operating stability.

Thus, at $Q = 0.7 \cdot Q_{\text{nom}}$, the double-tier impeller provides a more rational distribution of relative velocities in the inter-blade channels. This confirms the earlier conclusion about the effectiveness of such a design specifically in the low-flow zone, where high efficiency is maintained along with an increase in head.

Operating Mode $Q = 1.2 \cdot Q_{\text{nom}}$ (96 m³/h).

Figures 14–16 present the relative velocity fields in the impeller flow channels of the SVHN 80-32 pump at $Q = 1.2 \cdot Q_{\text{nom}}$. The analysis was carried out for three characteristic cross-sections: at the blade leading edge, in the midspan region, and near the impeller disk.

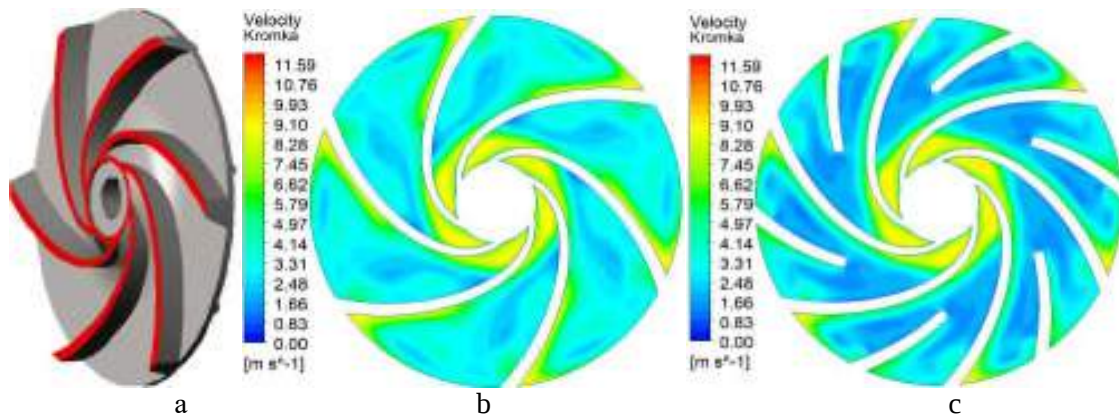


Fig. 14. Distribution of relative velocity in the impeller flow channels at the leading edge ($Q = 1.2 \cdot Q_{\text{nom}}$): a – cross-section location; b – six-blade impeller; c – double-tier impeller system

The comparison between the six-blade and the double-tier impellers shows that the overall flow structure remains similar to that of the optimal operating condition. However, at higher flow rates, the non-uniformity of velocity fields increases due to the higher discharge through the channels and the emergence of additional acceleration zones. For the six-blade impeller, this effect is more pronounced, manifesting as local regions of elevated velocity, which may lead to increased hydraulic losses.

In the case of the double-tier impeller, the relative velocity distribution is more balanced: even at high flow rates, the incidence on the blades remains relatively uniform, and no stagnant zones are formed. This is consistent with the head calculation results, where the double-tier configuration provides an additional head rise (up to 1.8 m, or more than 5% at $Q = 1.2 \cdot Q_{\text{nom}}$).

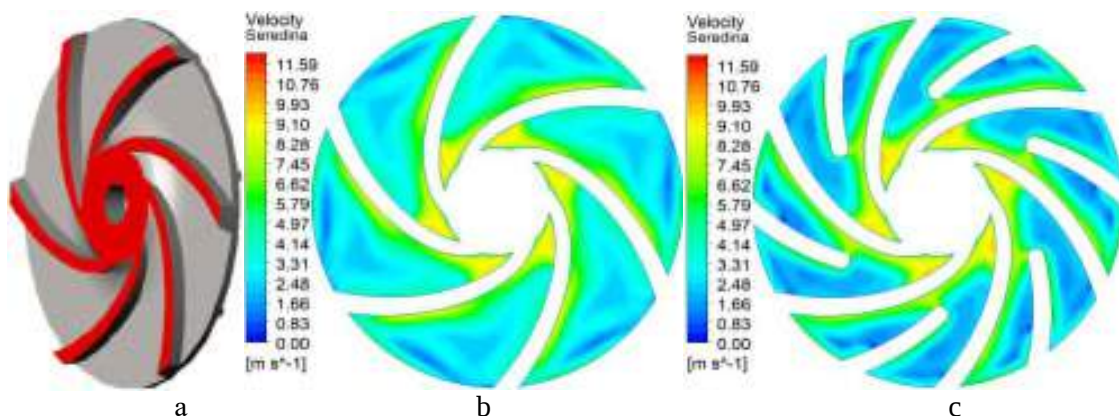


Fig. 15. Distribution of relative velocity in the impeller flow channels at the midspan ($Q = 1.2 \cdot Q_{\text{nom}}$): a – cross-section location; b – six-blade impeller; c – double-tier impeller system

Thus, at the upper boundary of the operating range ($Q = 1.2 \cdot Q_{\text{nom}}$), the double-tier blade system demonstrates better flow stability and more efficient utilization of the flow passage. This makes such a configuration more suitable for operation under high-flow conditions, where an additional head margin is required while maintaining efficiency values close to the maximum.

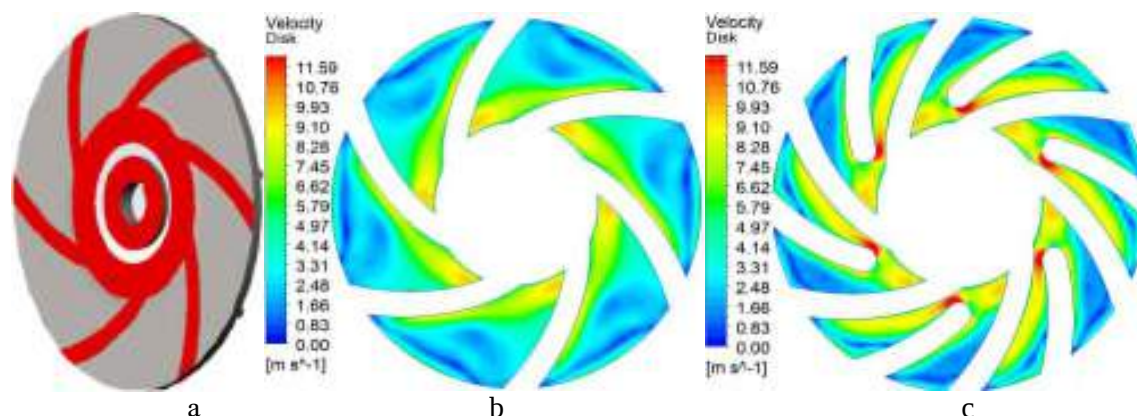


Fig. 16. Distribution of relative velocity in the impeller flow channels near the disk ($Q = 1.2 \cdot Q_{\text{nom}}$): a – cross-section location; b – six-blade impeller; c – double-tier impeller system

Flow Analysis in the Free Vortex Chamber

Further investigations concerned the distribution of static pressure and the components of absolute velocity (tangential V_u , axial V_z , and radial V_r) within the free vortex chamber of the TFP 80-32 pump. The calculations were performed in three characteristic zones: 5 mm from the casing wall, at the center of the free chamber, and near the blade edges.

Figure 17 presents the pressure fields, which correspond to the theoretically expected parabolic dependence on the reference radius. The obtained distribution is in full agreement with the fundamental equations of hydraulic machines, confirming the correctness of the CFD modeling.

The distribution of the tangential velocity component V_u (Fig. 18) also demonstrates the characteristic radial profile. At small radius ($R \approx 0.2R_2$), this component approaches zero, which corresponds to axial fluid inflow. The maximum values of V_u are observed near the outer diameter ($R = 0.8-1.0R_2$). The difference between the six-blade and the double-tier impellers is negligible, indicating a similar flow swirl structure.

Figure 19 shows the axial velocity component V_z , which clearly reflects the flow inlet and outlet regions. The inflow into the impeller occurs within the range $R = 0-0.4R_2$. In the double-tier configuration, the amount of fluid entering the impeller is approximately 10% higher than in the standard variant. The outflow occurs within $R = 0.6-1.0R_2$; for the double-tier impeller, the discharge is slightly higher, explained by the reduced share of the vortex component and the increased role of the blade-driven process.

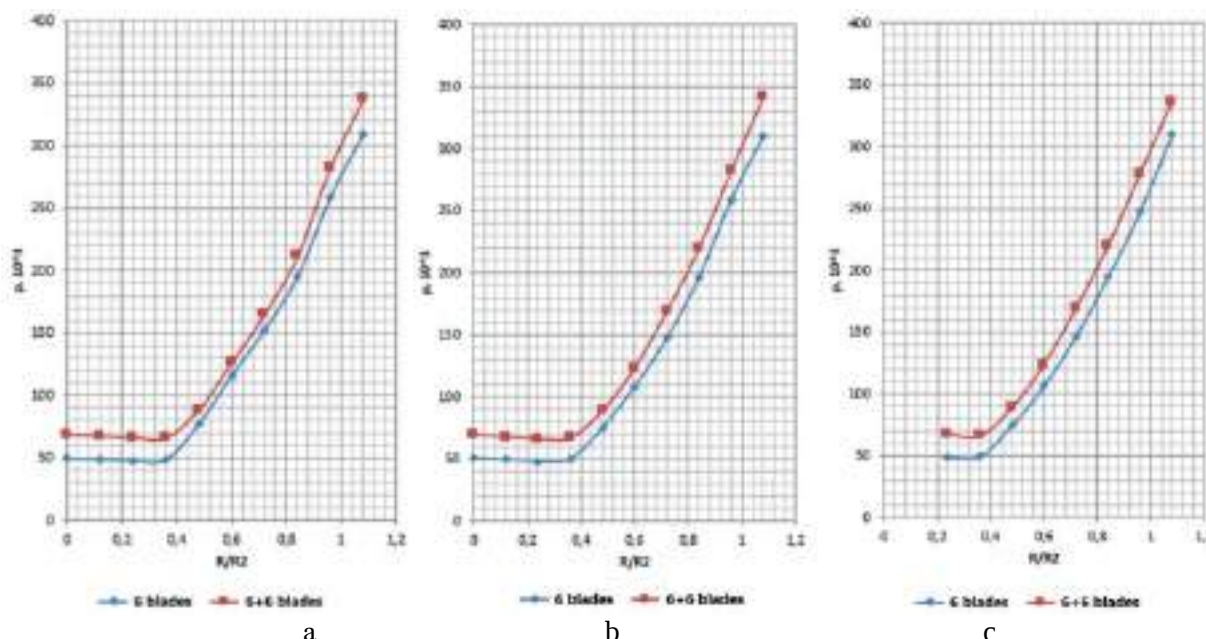


Fig. 17. Pressure distribution in the free vortex chamber of the TFP 80-32 torque-flow pump: a – 5 mm from the casing wall; b – at the center of the chamber; c – 5 mm from the blade edge

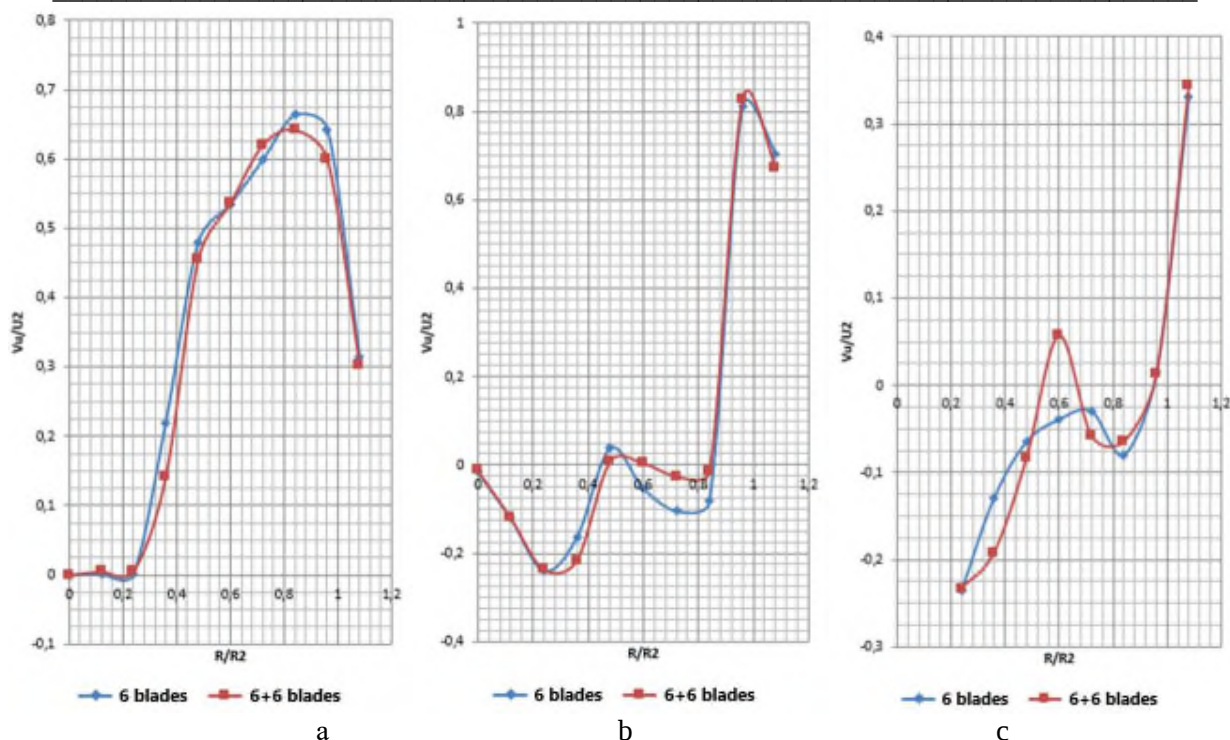


Fig. 18. Distribution of the tangential component of absolute velocity V_u in the free vortex chamber of the TFP 80-32 torque-flow pump: a – 5 mm from the casing wall; b – at the chamber center; c – 5 mm from the blade edge

The distribution of the radial velocity component V_r (Fig. 19) provides insight into the structure of the toroidal vortex [24] within the free chamber. The V_r values are somewhat higher for the double-tier impeller, which indicates a reduction in the intensity of the vortex-driven process and a greater involvement of the flow in the blade-driven mechanism.

Overall, the obtained results demonstrate that the double-tier blade system ensures more efficient utilization of the free vortex chamber, increases the share of blade-driven operation, and reduces vortex losses. This confirms its advantages compared to the standard six-blade impeller.

6. Conclusions

1. Based on the geometric parameters of the TFP 80-32 pump, solid models were developed and numerical simulations of the operating process were performed in ANSYS CFX. The applied methodology demonstrated good convergence of results and made it possible to obtain the complete characteristics of the pump across the entire operating flow range.

2. It was established that within the range $Q = 0.7\text{--}1.2 \cdot Q_{\text{nom}}$, the head characteristic has a stable, gradually decreasing trend, without signs of unstable operation. The hydraulic efficiency reaches 48.3% for the six-blade impeller and 47.5% for the double-tier impeller, which corresponds to the catalog values of pumps of this type.

3. The study showed that the use of the double-tier impeller provides a head increase of approximately 1.3 m ($\approx 3.4\%$ at $Q = Q_{\text{nom}}$ and up to 1.8 m at $Q = 1.2 \cdot Q_{\text{nom}}$) without significant efficiency losses. This confirms the feasibility of such a design in cases where an additional head margin is required.

4. The analysis of velocity fields in the inter-blade channels revealed that the six-blade configuration exhibits excessive channel diffusivity and uneven inflow, whereas the double-tier design ensures a smoother velocity distribution and reduces stagnant zones.

5. The investigation of the static pressure and velocity components (V_u , V_z , V_r) in the free vortex chamber confirmed that the double-tier blade system reduces vortex losses and increases the share of the blade-driven process. This improves flow stability and enhances pump efficiency across the entire operating flow range.

6. The obtained results provide the basis for practical recommendations regarding the application of torque-flow pumps with advanced impeller designs. They can also be used for further optimization of their construction in order to improve energy efficiency.

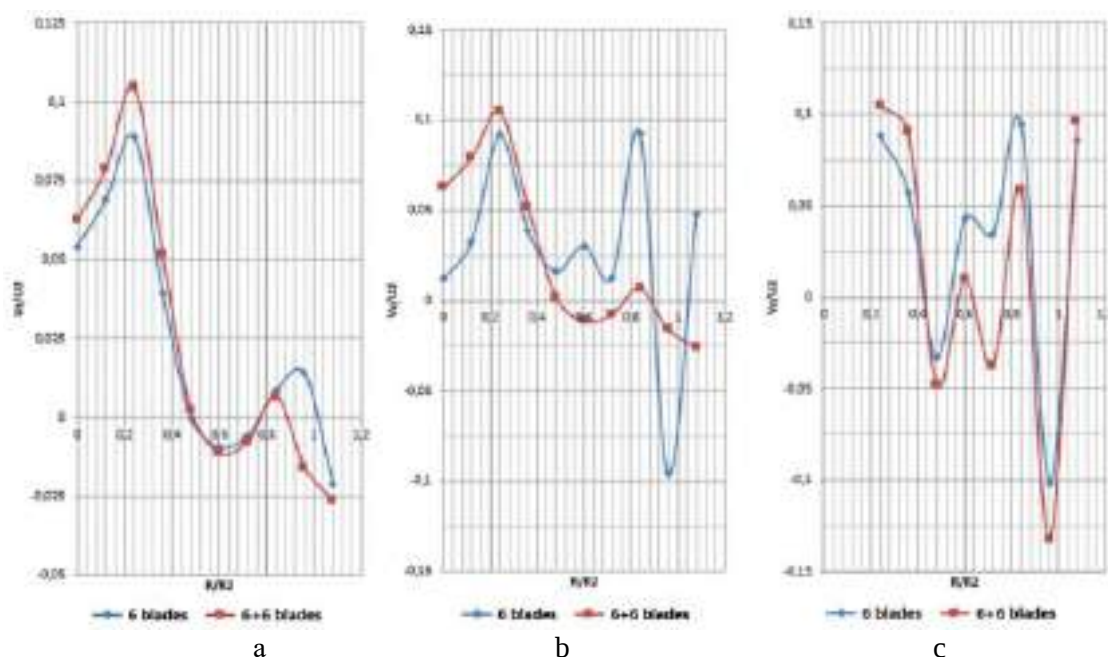


Fig. 19. Distribution of the axial component of absolute velocity V_z in the free vortex chamber of the TFP 80-32 torque-flow pump: a – 5 mm from the casing wall; b – at the chamber center; c – 5 mm from the blade edge

References:

1. Kotenko, A., Herman, V., Kotenko, A. (2014). Rationalization of Ukrainian industrial enterprises in a context of using torque flow pumps on the basis of valuation of the life cycle of pumping equipment. *Nauka i Studia*, Vol. 16 (126), pp. 83–91. <http://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream/123456789/38769/3/kotenko-poland1.PDF>
2. Gusak, O., Krishtop, I., German, V., Baga, V. (2017). Increase of economy of torque flow pump with high specific speed. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 233 012004. Retrieved from <https://doi.org/10.1088/1757-899X/233/1/012004>
3. Antonenko, S., Sapozhnikov, S., Kondus, V., Chernobrova, A., Mandryka, A. (2021). Creation a universal technique of predicting performance curves for small-sized centrifugal stages of well oil pump units. *Journal of Physics: Conference series*, Vol. 1741 012011. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1741/1/012011>
4. Oliveira A., Ramirez J. Design of Pumping Installations with the Energy-Efficient Pumps (EEP) Tool. *Energies*, Vol. 18(16), 4248. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/en18164248>
5. Dehnavi, E., Danlos, A., Solis, M., Kebdani, M., Bakir, F. (2024). Study on the pump cavitation characteristic through novel independent rotation of inducer and centrifugal impeller in co-rotation and counter-rotation modes. *Physics of Fluids*, Vol. 36(1), pp. 015120. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1063/5.0182731>
6. Quan, H., Chai, Y., Li, R., Guo, J. (2019). Numerical simulation and experiment for study on internal flow pattern of vortex pump. *Engineering Computations*, 36, 1579–1596. Retrieved from <https://doi.org/10.1108/EC-09-2018-0420>
7. Dehnavi, E., Solis, M., Danlos, A., Kebdani, M., Bakir, F. (2023). Improving the Performance of an Innovative Centrifugal Pump through the Independent Rotation of an Inducer and Centrifugal Impeller Speeds. *Energies*, 16(17), 6321. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/en16176321>
8. Jung, D.-W., Seo, C.-W., Lim, Y.-C., ... Lee, S.-Y., Suh, H.-K. (2023). Analysis of Flow Characteristics of a Debris Filter in a Condenser Tube Cleaning System. *Energies*, 2023, 16(11), 4472 Retrieved from <https://doi.org/10.3390/en16114472>
9. Krishtop, I., German, V., Gusak, A., Lugova, S., & Kochevsky, A. (2014). Numerical Approach for Simulation of Fluid Flow in Torque Flow Pumps. In *Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications, Ltd.*, 630, 43–51. Retrieved from <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.630.43>
10. Gerlach, A., Thamsen, P. & Lykholt-Ustrup, F. (2016). Experimental Investigation on the Performance of a Vortex Pump using Winglets. *ISROMAC 2016. International Symposium on Transport*

Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery. Retrieved from <http://isromac-isimet.univ-lille1.fr/upload-dir/finalpaper/181.finalpaper.pdf>

11.Krishtop, I. (2015). Creating the flowing part of the high energy-efficiency torque flow pump. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (74), 31–37. Retrieved from <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.39934>

12.Deaghan, A., Shojaeefard, M., Roshanaei, M. (2024) Exploring a new criterion to determine the onset of cavitation in centrifugal pumps from energy-saving standpoint; experimental and numerical investigation. *Energies*, Vol. 293, 130681. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2024.130681>

13.Kondus, V., Kalinichenko, P., Gusak, O. (2018). A method of designing of torque-flow pump impeller with curvilinear blade profile. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3/8 (93), 29–35. Retrieved from <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.131159>

14.Kondus, V., Puzik, R., German, V., Panchenko, V., Yakhnenko, S. (2021). Improving the efficiency of the operating process of high specific speed torque-flow pumps by upgrading the flowing part design. *Journal of Process Mechanical Engineering*, Vol. 237, pp. 1741 012023 <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1741/1/012023>

15.Gao, X., Shi, W., Zhang, D., Zhang, Q. & Fang, B. (2014). Optimization design and test of vortex pump based on CFD orthogonal test. *Nongye Jixie Xuebao/Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 45 (5), 101–106. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2014.05.016>

16.Kumar, J., Gopi, S., Amirthagadeswaran, K. (2023). Redesigning and numerical simulation of gating system to reduce cold shut defect in submersible pump part castings. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, Vol. 237 (3), pp. 971-981. <https://doi.org/10.1177/09544089221142185>

17.Panchenko, V., German, V., Ivchenko, O., Rysnaya, O. (2021). Combined operating process of torque flow pump. *Journal of Physics: Conference series*, Vol. 1741 012011. Retrieved from <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1741/1/012022>

18.Dehnavi, E., Bakir, F., Danlos, A., Kebdani, M. (2023). Numerical Analysis of Distance Effect between Inducer and Centrifugal Impeller in Independent Rotational Turbopump in Co-rotating and Counter-rotating Mode. *European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics, ETC*, 2023. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.29008/ETC2023-203>

19.Dehnavi, E., Bakir, F., Danlos, A., Kebdani, M. (2023). Numerical Analysis of Distance Effect between Inducer and Centrifugal Impeller in Independent Rotational Turbopump in Co-rotating and Counter-rotating Mode. *European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics, ETC*, 2023. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.29008/ETC2023-203>

20.Zhang, H., Deng, C., Chang, C., You, H. Novel dual synergistic sealing ring design for a high-pressure pump – Part I. Retrieved from [http://dx.doi.org/10.12968/s1350-4789\(22\)70085-2](http://dx.doi.org/10.12968/s1350-4789(22)70085-2)

21.Zhang, H., Deng, C., Chang, C., You, H. Novel dual synergistic sealing ring design for a high-pressure pump – Part II. Retrieved from [https://doi.org/10.12968/S1350-4789\(22\)70086-4](https://doi.org/10.12968/S1350-4789(22)70086-4)

22.Kondus, V., Puzik, R., German, V., Panchenko, V., Yakhnenko, S. (2021). Improving the efficiency of the operating process of high specific speed torque-flow pumps by upgrading the flowing part design. *Journal of Process Mechanical Engineering*, Vol. 237, pp. 1741 012023 <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1741/1/012023>

23.Kondus, V.; Kutenko A. (2017). Investigation of the impact of the geometric dimensions of the impeller on the torque flow pump characteristics. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 1/4 (88), pp. 25–31. Retrieved from <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.107112>

24.Rogovyi, A., Korohodskyi, V., Neskorozenyi, A., Hrechka, I., Khovanskyi, S., Reduction of Granular Material Losses in a Vortex Chamber Supercharger Drainage Channel. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing V. DSMIE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, pp. 218–226. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/978-3-031-06044-1-21>

Reviewer: Oleksandr Ivchenko, Acting vice-rector for scientific and international activities of the Sumy National Agrarian University, Ph.D., associate professor Head of the Department of technical systems design.

Д.М. Червінко, Л.С. Яблонь, В.О. Коцюбинський, Б. І. Рачій, О.П. Паховський,
І.М. Гасюк

Карпатський національний університет ім. Василя Стефаника

АНАЛІЗ КОМПЛЕКСНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОВІДНОСТІ ТКАНИНИ ПЕЧІНКИ СВИНІ

У поданому дослідженні проведено аналіз частотної залежності електричної провідності тканини печінки свині, що зазнавала впливу різних умов зберігання: природного старіння, охолодження, нагрівання та γ -опромінення. Для моделювання спектральних характеристик використано узагальнену модель Коула–Коула з двома дисперсіями (α та β) та компонентом провідності постійного струму. Оптимізація параметрів здійснювалася методом диференціальної еволюції. Результати показали, що модель забезпечує високу відповідність експериментальним даним у широкому діапазоні частот (0.01 Гц – 1 МГц). Найменші зміни електричних властивостей зафіксовано при зберіганні зразків при +5°C, тоді як найбільш виражені спостерігалися після нагрівання та тривалого перебування на повітрі. Високі значення параметрів α свідчать про полідисперсний характер релаксаційних процесів у досліджуваних тканинах. Отримані результати підтверджують ефективність використання моделі Коула–Коула для оцінки структурних змін у біологічних зразках, що відкриває перспективи для неінвазивної діагностики та біомедичних застосувань.

Ключові слова: дисперсія, біоімпеданс, провідність, діелектрична проникність, модель Коула–Коула, електрична томографія.

D.M. Chervinko, L.S. Yablon, V.O. Kotsiubynskyi, B.I. Rachii, O.P. Pakhovskiy, I.M. Hasiuk

ANALYSIS OF THE COMPLEX ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF PORCINE LIVER TISSUE

In the present study, the frequency dependence of the electrical conductivity of porcine liver tissue subjected to different storage conditions—natural aging, cooling, heating, and γ -irradiation—was analyzed. To model the spectral characteristics, the generalized Cole–Cole model with two dispersions (α and β) and a direct current conductivity component was employed. Parameter optimization was performed using the differential evolution method. The results demonstrated that the model provides a high degree of agreement with the experimental data over a wide frequency range (0.01 Hz – 1 MHz). The smallest changes in electrical properties were observed in samples stored at +5 °C, while the most pronounced alterations occurred after heating and prolonged exposure to air. High values of the α parameter indicate a polydisperse nature of the relaxation processes in the studied tissues. The findings confirm the effectiveness of the Cole–Cole model for assessing structural changes in biological samples, opening up prospects for non-invasive diagnostics and biomedical applications.

Keywords: dispersion, bioimpedance, conductivity, dielectric permittivity, Cole–Cole model, electrical tomography.

1. Вступ. Частотна дисперсія біологічних тканин — це зміна їх діелектричних властивостей залежно від частоти електричного поля. Ці характеристики включають комплексну відносну діелектричну проникність (ϵ) та провідність (σ) і зумовлені взаємодією електромагнітного поля зі структурою тканини на клітинному й молекулярному рівнях [1, 10].

Діелектричні властивості матеріалів визначаються на основі вимірної комплексної відносної діелектричної проникності, яка виражається як ($\epsilon_{\infty} = \epsilon' - j\epsilon''$). Тут ϵ' позначає відносну діелектричну проникність матеріалу, що відображає його здатність накопичувати електричну енергію, тоді як ϵ'' є коефіцієнтом втрат, що не співпадає по фазі. Коефіцієнт втрат ϵ'' також може бути виражений через провідність матеріалу за формулою:

$$\epsilon'' = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \omega}, \quad (1)$$

де σ представляє загальну провідність, ϵ_0 — діелектрична проникність вільного простору, а ω — кутова частота електричного поля. Ці властивості, ϵ' та ϵ'' (або ϵ' та σ), визначаються як функція частоти, відображаючи повний спектр поведінки електричних властивостей біологічної тканини [1, 5].

Розуміння подібних властивостей біологічних тканин у діапазоні 10 Гц – 100 МГц має велике значення для медичної діагностики, розробки засобів електромагнітного захисту [3] та електромагнітної дозиметрії, яка потребує моделювання сценаріїв опромінення та розрахунку внутрішніх електричних полів у тілі [4, 5, 6].

Діелектричні характеристики тканин містять інформацію про їх морфологію й функцію [3, 11]. Зміни клітинної структури, вмісту рідин чи цілісності мембран, характерні для захворювань (наприклад, рак або запалення), проявляються як зміни частотно-залежних електричних властивостей. Це створює причинно-наслідковий зв'язок між мікроскопічними змінами та макроскопічними електричними реакціями, що лежить в основі неінвазивних діагностичних технологій [13, 14].

© Д.М. Червінко, Л.С. Яблонь, В.О. Коцюбинський, Б. І. Рачій, О.П. Паховський,
І.М. Гасюк

Для їх впровадження потрібні комплексні й стандартизовані бази діелектричних властивостей тканин, розподілені за частотами, типами тканин і фізіологічними/патологічними станами [1, 6]. Значна варіабельність наявних даних підкреслює потребу у точному зборі та моделюванні для забезпечення достовірності результатів [1].

Діелектричні властивості матеріалів кількісно визначаються їхньою виміряною комплексною відносною діелектричною проникністю (ϵ_∞), яка виражається як $\epsilon_\infty = \epsilon' - j\epsilon''$. Тут ϵ' представляє відносну діелектричну проникність, що є мірою здатності матеріалу накопичувати енергію через електричну поляризацію у відповідь на прикладене зовнішнє поле [1].

З іншого боку, ϵ'' є коефіцієнтом втрат за рахунок неспівпадіння за фазою зовнішнього і наведеного електричного поля, і відображає розсіювання енергії у зразку. Коефіцієнт втрат ϵ'' може включати внесок від частотно-незалежної іонної провідності σ . Співвідношення $\epsilon'' = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \omega}$, демонструє, як провідність пов'язана з діелектричними втратами, де ϵ_0 — діелектрична проникність вільного простору, а ω — кутова частота прикладеного зовнішнього поля [1].

Взаємозв'язок між провідністю (σ) та діелектричною проникністю (ϵ' , ϵ'') є важливим: на низьких частотах навіть незначна іонна провідність викликає великі діелектричні втрати (ϵ''), тоді як на високих частотах цей ефект зменшується. Провідність відображає рух заряду, тоді як ϵ' — його накопичення; обидва параметри взаємопов'язані та залежать від частоти [8].

Діелектричний спектр тканин має три основні дисперсійні ділянки, зокрема α -дисперсія (нижче 100 Гц) пов'язана з іонною дифузією на клітинних мембранах і є чутливим показником метаболічної активності [1]. Також присутні β -дисперсія (~ сотні кГц), яка зумовлена поляризацією клітинних мембран і білків та являє собою релаксацію Максвелла–Вагнера, яка відображає зміни клітинної цілісності, розмірів клітин і міжклітинної рідини [1, 2] та γ -дисперсія (гігагерцовий діапазон), яка зумовлена поляризацією молекул води і відображає її вміст у тканинах, що є діагностично важливим при патологіях, пов'язаних із гідратацією [1, 3, 4].

Інші види дисперсії, як-от δ -дисперсія, також можуть бути присутні [4], але мають менше діагностичне значення.

Чітко виражені α , β та γ дисперсії, пов'язані з різними біомеханізмами, дозволяють отримати багатомасштабну інформацію про тканину — від молекулярних до макроскопічних рівнів. Вимірювання в широкому частотному діапазоні дає змогу комплексно оцінити рідинні компартменти, клітинну цілісність і молекулярні взаємодії, що робить цей підхід ефективнішим за одночастотні методи.

Табл. 1.

Основні дисперсійні діапазони біологічних тканин

Тип дисперсії	Частотний діапазон	Механізм
α (Альфа)	< 100 Гц	Іонна дифузія на клітинній мембрані
β (Бета)	Сотні кГц	Поляризація клітинних мембран (релаксація Максвелла-Вагнера)
γ (Гамма)	Гігагерцовий діапазон	Поляризація молекул води

Для досліджень діелектричних процесів у біологічній тканині використовують біоімпедансний аналіз (БІА) який активно застосовують, наприклад, для визначення складу тіла — зокрема жирову й м'язову масу — шляхом вимірювання імпедансу при пропусканні слабкого струму [16, 17, 18, 19]. На низьких частотах струм проходить лише через позаклітинну рідину (ECF), оскільки мембрани діють як ізолятори. На високих — струм проходить також через внутрішньоклітинну рідину (ICF), оскільки мембрани поведуться як конденсатори [19]. Ця поведінка описується моделлю з резисторами для ECF ($R-E$) та ICF ($R-I$) і конденсатором для мембран ($C-M$) [15, 19]. БІС у широкому частотному діапазоні формує імпедансний локус у вигляді дуги [19]. Основний принцип — низькі частоти досліджують ECF, високі — ECF і ICF — дозволяє оцінити TBW, ECW та ICW [21]. Це важливо для діагностики станів (лімфедема, серцева недостатність, зневоднення) [22].

За необхідності візуалізації результатів у реальному часі, використовують електричну імпедансну томографію (EIT) — неінвазивний метод реконструювання зображення на основі електричної провідності тканин [7, 13]. Біологічна тканина складається з клітин із провідною рідиною, оточених ізолюючими мембранами, які формують її електричні властивості [7]. При застосуванні EIT частотна залежність є критичною [7].

Цей ефект лежить в основі багаточастотної ЕІТ (ЕІТ-MF), яка дозволяє візуалізувати різні типи тканин (жирова, м'язова, легенева) та фізіологічні зміни [7]. Частотно-залежний контраст дає змогу диференціювати тканини та виявляти аномалії на основі їх електричних властивостей.

Вимірювання електричних властивостей тканин також можливе з використанням різних електродних конфігурацій, кожна з яких має свої переваги та обмеження [17, 18]. **Двоелектродний** (біполярний) метод передбачає вимірювання напруги між тими ж електродами, через які подається струм. Проте високий і нестабільний імпеданс електрод-електроліт, особливо на низьких частотах, значно спотворює результати, що обмежує застосування цього методу для м'яких тканин. В той же час **чотириелектродний метод** (тетраполярний) є надійнішим для біотканин. Струм подається через одну пару електродів, а напруга вимірюється через іншу, що мінімізує вплив імпедансу на точність вимірювання. Однак навіть тут на низьких частотах інтерфейсний імпеданс може викликати помилки. **Багатоелектродні системи** (наприклад, з 8 електродами) дозволяють вимірювати імпеданс різних сегментів тіла без перестановки електродів. Порівняння методів показує, що вибір схеми вимірювання та електродів критично впливає на достовірність даних, особливо при дослідженні низькочастотних α -дисперсій [18]. Постає задача пошуку умовонезалежних параметрів для однозначної експертної оцінки стану тканини.

В той же час, для опису діелектричних процесів у біологічній тканині, зокрема, релаксації, використовуюється модель Коула–Коула, особливо коли дисперсія зумовлена численними внесками [4]. Коефіцієнти дисперсійної залежності можуть слугувати індикаторами типу та ступені пошкодження тканин.

Комплексна відносна діелектрична проникність $\varepsilon(\omega)$ як функція кутової частоти (ω) у рівнянні Коула–Коула виражається наступним чином:

$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon_{\infty} + (j\omega\tau) (1-\alpha) \Delta\varepsilon, \quad (2)$$

де ε_{∞} представляє діелектричну проникність при дуже високих частотах поля, де $\omega\tau \gg 1$ [4], $\Delta\varepsilon$ позначає величину дисперсії, що визначається як різниця між діелектричною проникністю при дуже низьких частотах поля (ε_0) та ε_{∞} ($\varepsilon_0 - \varepsilon_{\infty}$) [4], $\Delta\varepsilon$ — це величина дисперсії, яка дорівнює різниці між проникністю на низьких частотах, (ε_0) та ε_{∞} ($\varepsilon_0 - \varepsilon_{\infty}$) [4], j — уявна одиниця ($j = \sqrt{-1}$), τ — часова константа, що описує поляризаційний процес, α — параметр розподілу (0–1), який визначає ширину дисперсії; при $\alpha = 0$ модель Коула–Коула зводиться до моделі Дебая [4].

Для біологічних тканин точніший опис забезпечує модель з кількома дисперсіями Коула–Коула, що також включає термін провідності [4].

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \varepsilon_n(1 + (j\omega\tau_n)^{\alpha}) (1-\alpha) \Delta\varepsilon_n + j\omega\varepsilon_0\sigma_i \quad (3)$$

Сума дисперсій у моделі Коула–Коула враховує кілька складових із власними параметрами $\Delta\varepsilon_n$, τ_n та α_n . σ_i — статична йонна провідність [4]. Ця багатотермінова модель застосовується для розрахунку ε' та σ в тканинах у діапазоні 10 Гц – 100 ГГц [4].

Використання чотирьох дисперсій і параметра α забезпечує точну відповідність експериментальним даним, що підтверджує складну й неоднорідну природу біологічних тканин. Гнучкість моделі Коула–Коула робить її ефективнішою за прості моделі, зокрема модель Дебая, за якої параметр $\alpha=0$ [4].

Дебайські моделі зручні для чисельного моделювання, зокрема у методі скінченних різниць у часовій області (FDTD) [12]. Однак для опису складних біологічних систем модель Коула–Коула, що враховує гетерогенність і розподіл релаксацій (через параметр α), є точнішою [4]. Перехід від Дебая до Коула–Коула відображає зростання вимог до точності біомедичних моделей.

2. Матеріали та методи. Для отримання імпедансних спектрів як модельний біологічний матеріал використовували тканини органів печінки свині. Після забою орган тварини охолоджувався та витримувався у термостаті за температури $+4^{\circ}\text{C}$. Проведення експерименту розпочиналося через 5–6 годин після забору біоматеріалу.

Зразки тканин формувались у пластиковому корпусі медичного шприца об'ємом 2 мл, що слугував вимірювальною коміркою [20]. Розміри зразка становили: діаметр основи — 10 мм, висота — 5–20 мм. Деструктивними чинниками впливу вибрали зберігання у воді, розчин тіосечовини, γ -опромінення, витримування на повітрі при кімнатній температурі, 5°C та 60°C протягом 1 години.

Реєстрація імпедансних спектрів здійснювалася за допомогою спектрометра AUTOLAB PGStat 30 у частотному діапазоні від 0,01 Гц до 100 кГц. Для мінімізації впливу електричної напруги на структуру органічних тканин амплітуда вимірювального сигналу обмежувалась інтервалом 0–5 мВ. Термостатування здійснювалось за допомогою стандартного термостату моделі 1/120 СПУ, що забезпечувало стабільні температурні умови протягом усього експерименту.

Для апроксимації частотних спектрів провідності застосовано модель Коула–Коула з двома релаксаційними компонентами та провідністю постійного струму.

Функція апроксимації має вигляд:

$$\sigma^*(\omega) = \sigma_{\infty} + \frac{\Delta\sigma_{\alpha}}{1 + j\omega\tau_{\alpha}^{1-\alpha_{\alpha}}} + \frac{\Delta\sigma_{\beta}}{1 + j\omega\tau_{\beta}^{1-\alpha_{\beta}}} + \frac{\sigma_{dc}}{j\omega} \quad (4)$$

Оптимізацію параметрів виконано методом диференціальної еволюції на логарифмічно рівномірно вибраних частотах. Проаналізовано п'ять зразків, кожен із яких було змодельовано окремо.

3. Результати та обговорення. Нижче подано таблицю оцінених параметрів моделі Коула–Коула для кожного зразка:

Табл. 2.

Параметри моделі Коула–Коула

Зразок	σ_{dc} , S/m	σ_{∞} , S/m	$\Delta\sigma_{\alpha}$, S/m	τ_{α} , s	α_{α}	$\Delta\sigma_{\beta}$, S/m	τ_{β} , s	α_{β}
Інтактний	$1,01 \cdot 10^{-9}$	$3,02 \cdot 10^{-4}$	$2,11 \cdot 10^{-7}$	$4,62 \cdot 10^{-3}$	1	$1,44 \cdot 10^{-7}$	0,934	1
24 год.	$1,00 \cdot 10^{-9}$	$1,02 \cdot 10^{-5}$	$1,07 \cdot 10^{-7}$	$3,93 \cdot 10^{-4}$	1	$3,50 \cdot 10^{-7}$	0,614	1
γ -опромінення	$1,03 \cdot 10^{-9}$	$7,24 \cdot 10^{-5}$	$1,52 \cdot 10^{-7}$	$3,94 \cdot 10^{-3}$	1	$1,91 \cdot 10^{-7}$	0,994	1
5°C	$1,02 \cdot 10^{-9}$	$7,10 \cdot 10^{-5}$	$1,42 \cdot 10^{-7}$	$1,09 \cdot 10^{-3}$	1	$3,61 \cdot 10^{-7}$	0,738	1
60°C	$1,01 \cdot 10^{-9}$	$6,11 \cdot 10^{-4}$	$2,67 \cdot 10^{-7}$	$5,31 \cdot 10^{-3}$	1	$2,44 \cdot 10^{-7}$	0,989	1

Результати демонструють відчутні відмінності спектрів провідності між зразками. Зразок, витриманий 24 години на повітрі, показав суттєве зниження провідності та зміщення релаксаційних часів, що свідчить про деградацію клітинних структур. Опромінення γ -променями також вплинуло на провідність, але меншою мірою. Найменші зміни спостерігалися після охолодження до +5°C, тоді як нагрів до +60°C спричинив значне підвищення провідності — ймовірно, через термічну деструкцію мембран та вивільнення іонів. Значення параметрів α у всіх випадках наближені до 1, що вказує на широкі спектри релаксацій у тканині.

Альфа-дисперсія характеризується такими параметрами, як час релаксації $\tau_{\alpha} = 2.17 \times 10^{-3}$ с, амплітуда $\Delta\sigma_{\alpha} = 1.30 \times 10^{-7}$ С/м, параметр ширини розподілу $\alpha_{\alpha} \approx 1.00$, що свідчить про наявність високоспецифічного процесу релаксації, ймовірно пов'язаного з поляризацією мембран або субклітинними структурами. Бета-дисперсія виявилася виразнішою, зокрема, бо $\tau_{\beta} = 0.483$ с, $\Delta\sigma_{\beta} = 4.20 \times 10^{-7}$ С/м, $\alpha_{\beta} \approx 1.00$, що, ймовірно, відображає інтерфейсні поляризаційні ефекти, зокрема явище Максвелла–Вагнера на клітинному рівні.

Частотна залежність імпедансу свідчить про перехід від резистивної до ємнісної поведінки, а фазовий кут демонструє типові переходи дисперсій, що відповідають електричним спектрам біотканин. Результати підтверджують, що електричні властивості печінки визначаються множинними релаксаційними процесами, добре описуваними моделлю Коула–Коула. Параметри α , близькі до 1, вказують на структурну неоднорідність тканини.

Окрім цього, можна зауважити, що вихідний зразок мав характерний спектр з α - та β -дисперсіями ($\tau_{\alpha} = 4.6 \times 10^{-3}$ с, $\tau_{\beta} = 0.93$ с, $\sigma_{\infty} = 3.02 \times 10^{-4}$ С/м), що свідчить про збережену структуру. Після 24 годин на повітрі провідність зменшилась у 30 разів, α -дисперсія зсунулася — це вказує на деградацію мембран. Ультразвук та γ -опромінення спричинили помірні зміни, без повної деструкції структури. Зберігання при +5°C зберегло α -дисперсію, що свідчить про ефективну консервацію. Нагрів до +60°C спричинив зростання σ_{∞} ($\sim 6.1 \times 10^{-4}$ С/м) та посилення дисперсій — ознака теплової денатурації. Загалом усі зразки мали $\alpha \approx 1$, що вказує на полідисперсний характер релаксацій. Найбільші зміни спостерігались після висушування та нагрівання, найменші — після охолодження.

Висновки. Частотну залежність комплексної електричної провідності тканини печінки свині було проаналізовано із застосуванням узагальненої моделі Коула–Коула, що включає дві дисперсії (α - та β -дисперсію) і компоненту провідності постійного струму (σ_{dc}). Модель забезпечила високу відповідність експериментальним даним у всьому дослідженому діапазоні частот (від 0.01 Гц до приблизно 1 МГц), що підтверджує її адекватність для опису електричних властивостей біологічних тканин. Оптимізовані параметри свідчать, що високочастотна провідність (σ_{∞}) становила 3.02×10^{-4} С/м, тоді як провідність постійного струму (σ_{dc}) була малою – 1.06×10^{-9} С/м, що вказує на незначний внесок іонної провідності на низьких частотах. Наявність двох дисперсій підтверджена двома релаксаційними компонентами, які відображають складну структуру тканини. Аналіз спектрів провідності за різних умов зберігання тканини дозволяє надійно ідентифікувати структурні зміни — від деградації мембран до термічної денатурації. Це відкриває перспективи для створення неінвазивних діагностичних технологій та методів контролю якості біоматеріалів.

© Д.М. Червінко, Л.С. Яблонь, В.О. Коцюбинський, Б. І. Рачій, О.П. Паховський,
І.М. Гасюк

Список посилань

1. Gabriel, Camelia & Gabriel, Sami & Corthout, E. (1996). The dielectric properties of biological tissues: I. Literature survey. *Physics in medicine and biology*, 41, 2231-49. 10.1088/0031-9155/41/11/001.
2. Grimnes, Sverre & Schwan, Herman. (2002). Interface Phenomena and Dielectric Properties of Biological Tissue. 20.
3. Shi, Y., Bai, X., Yang, J., Wu, X., & Wang, L. (2025). Optimized measurement methods and systems for the dielectric properties of active biological tissues in the 10Hz-100 MHz frequency range. *Frontiers in physiology*, 16, 1537537. <https://doi.org/10.3389/fphys.2025.1537537>.
4. Gabriel, S., Lau, R. W., & Gabriel, C. (1996). The dielectric properties of biological tissues: III. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues. *Physics in medicine and biology*, 41(11), 2271–2293. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/41/11/00>.
5. Gabriel, C., Gabriel, S., & Corthout, E. (1996). The dielectric properties of biological tissues: I. Literature survey. *Physics in Medicine and Biology*, 41(11), 2231–2249. DOI: 10.1088/0031-9155/41/11/001.
6. Zhang, Y., & Lee, T. (2023). Current status and emerging techniques for measuring the dielectric properties of biological tissues. *ASME Open Journal of Engineering*, 3, Article 031005. DOI: 10.1115/1.4064746.
7. Holder, D. (2021). Electrical impedance tomography – Recent applications and developments. *Journal of Biomedical Imaging*.
8. Kuang, W., & Nelson, S. O. (1998). Low-frequency dielectric properties of biological tissues: A review with some new insights. *Transactions of the ASAE*, 41(1), 173–184. DOI: 10.13031/2013.17142.
9. Crowell, L. L., Yakisich, J. S., Aufderheide, B., & Adams, T. N. G. (2020). Electrical Impedance Spectroscopy for Monitoring Chemoresistance of Cancer Cells. *Micromachines*, 11(9), 832. <https://doi.org/10.3390/mi11090832>.
10. Etoz, S., & Brace, C. L. (2019). Development of Water Content Dependent Tissue Dielectric Property Models. *IEEE journal of electromagnetics, RF and microwaves in medicine and biology*, 3(2), 105–110. <https://doi.org/10.1109/jerm.2018.2881692>.
11. Cole, K. S., & Cole, R. H. (1941). Dispersion and absorption in dielectrics I. Alternating current characteristics. *Journal of Chemical Physics*, 9(4), 341–351. DOI: 10.1063/1.1750906.
12. Eleiwa, Mohamed & Elsherbeni, Atef. (2001). Debye Constants for Biological Tissues from 30 Hz to 20 GHz. 16. 202-213.
13. Zhang, M., Li, Y., & Wang, R. (2023). Novel sensing technique for stem cells differentiation using dielectric spectroscopy of their proteins. *Sensors*, 23(5), 2397. DOI: 10.3390/142482397.
14. Stoneman, M. R., & Raicu, V. (2021). Dielectric Spectroscopy Based Detection of Specific and Nonspecific Cellular Mechanisms. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 21(9), 3177. <https://doi.org/10.3390/s21093177>.
15. Dovancescu, Silviu & Saporito, Salvatore & Herold, Ingeborg & Korsten, Hendrikus & Aarts, R. & Mischi, Massimo. (2017). Monitoring thoracic fluid content using bioelectrical impedance spectroscopy and Cole modeling. *Journal of Electrical Bioimpedance*. 8. 107. 10.5617/jeb.5611.
16. Zachariah, Vidhya & P S, Priyamvada. (2024). Bioimpedance Analysis: Basic Concepts. *Journal of Renal Nutrition and Metabolism*. 8. 30-34. 10.4103/JRNM.JRNM-9-23.
17. Kyle, U. G., Bosaeus, I., De Lorenzo, A. D., Deurenberg, P., Elia, M., Gómez, J. M., Heitmann, B. L., Kent-Smith, L., Melchior, J. C., Pirlich, M., Scharfetter, H., Schols, A. M., Pichard, C., & Composition of the ESPEN Working Group (2004). Bioelectrical impedance analysis--part I: review of principles and methods. *Clinical nutrition (Edinburgh, Scotland)*, 23(5), 1226–1243. <https://doi.org/10.1016/j.clnu.2004.06.004>.
18. Cheney, M., et al. (1999). Electrical impedance tomography. *SIAM Review*, 41(1), 85–101. DOI: 10.1137/S0036144598333613.
19. Al-Ali, A., et al. (2020). Smart bioimpedance spectroscopy device for body composition estimation. *Sensors*, 20(1), 70. DOI: 10.3390/s20010070.
20. Taras Pryimak, Oksana Popadynets, Ivan Gasiuk, Taras Kotyk. (2021). Electrical impedance spectrum transformation of liver tissues under the influence of temperature. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 11(12), 1–11. <https://doi.org/10.9790/9622-1112010111>.

М. Є. Чернова

ФІЗИКА АСПЕКТІВ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ЯВИЩ У ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ*Івано-Франківській Національній технічній університет нафти і газу*

Стаття присвячена проблемам технологічного процесу, що описується фізичними законами, зокрема явищами перенесення та енергією потоку неньютонівської рідини. Проводиться спроба опису руху рідини в обмеженому просторі з можливістю її транспортуючої здатності, на основі ефекту Чоломея, тобто здатності певних часток у рідині піддаватися явищу спливання. До прикладу, таке явище спричинює краще очищення забою свердловини (нафто-газової чи іншої), що будується. Метою є забезпечення опису потоку рідини, здатної у достатньо замкнутому просторі, за рахунок певних явищ та процесів, створювати турбулентний потік технічної рідини, котра використовується, й тим самим здатна забезпечувати реалізацію відповідних технологічних процесів, котрі є необхідні у технічному виконанні. Одним з таких напрямків є забезпечення стійкого обертово-поступальний рух течії потоку, що досягається за певних значень числа Фруда (Fr), котрі є різними для рідин з різними реологічними властивостями. Так до прикладу, число Рейнольдса (Re) неньютонівської рідини мусить володіти значенням, що є удвічі більшим ніж у аналогічній, за молекулярним складом неньютонівської. Між такими рідинами існує функціональний зв'язок, що описується параболічною залежністю. Інтуїтивно, за накопиченим досвідом, створено певні пристрої, котрі здатні вирішувати проблему, зазначену вище, але в науці експеримент мусить бути підтвердженням теорії, а теорія – експериментом. На сьогодні, на превеликий жаль є відсутніми методичні рекомендації, що враховували б, з точки зору фізики, для технологів специфіку гідродинамічних процесів, до прикладу, у часі будівництва похило-скерованих і горизонтальних свердловин, відповідними засобами та пристроями. А то є важливе обґрунтування задля створення задуманих основних засад у цьому напрямку, результатом котрих є відповідність та теоретичне підтвердження аксіомних технологічних напрацювань, котрими у значній кількості володіють роботодавці на нафтогазових підприємствах. У першому наближенні поставлена мета досягнута шляхом застосування співвідношень для неперервного потоку, котрі враховують кінематичні характеристики рідини.

Ключові слова: фізика явищ перенесення, коливання, турбулентність, струмина, нестационарний потік, енергія потоку, неньютонівська рідина.

M.Je. Chernova

PHYSICS OF ASPECTS IN HYDRODYNAMIC PHENOMENA IN TECHNOLOGICAL PROCESSES

The article is devoted to the problems of the technological process described by physical laws, in particular, the phenomena of transfer yet energy of the flow of a non-stationary fluid. An attempt is made to describe the movement of a liquid in a confined space with the possibility of its transporting capacity, based on the Cholomew effect, i.e. the ability of certain particles in a liquid to undergo the phenomenon of surfacing. For example, such a phenomenon causes better cleaning of the bottom of a well (oil and gas or other) being constructed. The goal is to provide a description of the flow of a fluid capable, in a sufficiently closed space, due to certain phenomena and processes, of creating a turbulent flow of the technical fluid used, and thereby capable of ensuring the implementation of the corresponding technological processes necessary for technical fulfillment. One of these directions is to ensure stable rotational-transitional flow motion, which is achieved at certain values of the Froude number (Fr), which are different for liquids with different rheological properties. For example, the Reynolds number (Re) of a Newtonian fluid must have a value that is twice that of a non-Newtonian fluid with similar molecular composition. There is a functional relationship between such fluids, described by a parabolic relationship. Intuitively, based on accumulated experience, certain devices have been created that are capable of solving the problem mentioned above, but in science, an experiment must be confirmed by theory, and theory by experiment. Today, unfortunately, there are no methodological recommendations that would take into account, from the point of view of physics, the specifics of hydrodynamic processes for technologists, for example, during the construction of inclined and horizontal wells, with appropriate means and devices. And this is an important justification for creating the intended basic principles in this direction, the result of which is the correspondence and theoretical confirmation of axiomatic technological developments, which are possessed in significant quantities by employers in the oil and gas fields. In a first approximation, the goal is achieved by applying relations for continuous flow, which take into account the kinematic characteristics of the fluid.

Keywords: physics of transport phenomena, oscillations, turbulence, jet, unsteady flow, flow energy, non-Newtonian fluid.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науково-практичними завданнями. У часі повоєнної відбудови України, а на сам перед стосовно відновлення нафто-газового комплексу, котрий здатний забезпечити нашу державу власними вуглеводневими енергоносіями більше ніж на 60%, ефективність та швидкість буріння похило-скерованих (ПС) і горизонтальних свердловин (ГС) залежить від якісного очищення забою та швидкого винесення розбуреної породи на денну поверхню. Це забезпечить відсутність явища повторного перемелювання породи, що руйнується буровим інструментом, а заразом пришвидшить час будівництва свердловини, практично на 30%. Якщо врахувати основні показники, що складають собівартість будівництва свердловини, зокрема, ціна орендованого обладнання, оплата праці

співробітникам компанії, витратні ресурси, то набігає значна сума у кошторисі. Кожна з нафтогазових компаній володіє власними засобами та пристроями, котрі здатні забезпечити ці відсоткові показники й технологічно представляють собою патенти на винахід, що належать державі-агресору або ж патенти на корисну модель, котрі видає Україна, але їх напрацювання є інтуїтивно-технічними аніж науково обґрунтованими.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як відомо, намагання теоретично розглянути умови формування стійкого обертово-поступального руху промивальної рідини в позатрубному просторі свердловини, що будується, за рахунок енергії потоку рідини з можливістю регулювання її гідродинамічними параметрами й структурою самого потоку, практично не розглядалося. Врахування гірничо-геологічних характеристик нафто-газового родовища також є не останньою справою. У багатьох авторських патентах, починаючи від минулого століття й до тепер, [1, 2] зазначається, що розроблені пристрої й технічно-технологічні засоби створюють турбулентний потік рідини значної потужності для якісного очищення забою та винесення розбуреної породи, як такої, на денну поверхню. Але усі напрацювання є швидше інтуїтивно – практичними. Теоретичного дослідження у цьому плані, практично не проводилось.

Формулювання цілей статті полягає у намаганні підібрати певні математичні залежності задля можливості описати енергетичні характеристики турбулентного потоку промивальної рідини, до прикладу, в кільцевому просторі свердловини. Бо є відомо про те, що турбулентний потік, володіючи певними енергетичними характеристиками, мусить утворюватися у просторі між стінками стовбура свердловини та стінками бурової колони.

Пропоновані обчислення, що проводились, були із застосуванням комп'ютерної програми «МАТКАД». За допомогою неї проводились розрахунки енергетичних параметрів стійкого обертово-поступального потоку, до прикладу для сучасної біополімерної промивальної рідини, склад котрої кожна компанія тримає у секреті, але мета в усіх технологів є однаковою, а саме, забезпечити зниження водовіддачі, бо то є водний розчин високомолекулярного полімеру, розчин мусить запобігати диспергуванню порід, що буряться, покращувати реологічні властивості цього самого бурового розчину, забезпечити підвищення його транспортуючої здатності а разом, той розчин мусить забезпечити охолодження інструменту з одночасним підтриманням гідростатичного тиску у свердловині, як такий. Але ці характеристики рідини, у даному контексті нас не цікавлять, бо не про них мова, хоча мусимо наявність завдань рідини враховувати.

На превеликий жаль, ті що залишилися уцілілими в часі війни, нафтові й газові родовища нашої держави мають значно виснажені основні запаси. Тому, у повоєнний час відбудови нафто-газового комплексу нашої держави, надзвичайно актуальним і важливим є впровадження вітчизняних технологій і технічних засобів задля підвищення ефективності бурових робіт, спрямованих на збільшення видобутку нафти і газу. За аналізом останніх літературних джерел [3, 4] засвідчено, що найефективнішим методом підвищення дебіту виснажених свердловин, та таких родовищ, що перебувають в надрах певних територіальних громад, є будівництво похило-скерованих (ПС) та горизонтально-скерованих (ГС) свердловин. Фахівцями нафтогазовидобувних компаній світу, як до прикладу, США, Канади, Туркменістану, Казахстану, Франції, ОАЕ та інших, напрацьовано багато сучасних технологій для успішного буріння такого типу свердловин. Однак, як засвідчили раніше наведені промислові дослідження [5], відомі напрацювання не є придатними до буріння ПС і ГС свердловин на родовищах України, позаяк тут існують на певних глибинах, зокрема в діапазоні 2÷3 км горизонти нестійких порід. Тому, власне, в часі розроблення технології будівництва тих чи інших ПС й ГС свердловин, щоразу потрібно враховувати гірничо-геологічні особливості тих чи інших наших родовищ. Разом з тим важливим напрямком робіт, у часі будівництва ПС і ГС свердловин є створення технічних засобів і технологій, що враховують також і специфіку гідродинамічних процесів, котрі наявні у свердловині в часі її будівництва. Промислові дані засвідчують, що через неефективне очищення похило-скерованого і горизонтального стовбура свердловини, що будується, стаються різного роду ускладнення та аварії, що спричинює додаткові матеріальні затрати й не лише. Таким чином, вдосконалення гідродинамічних явищ, що супроводжують будівництво ПС і ГС свердловин є одним із нагальних завдань сьогодення. А надто важливим є формування стійкого обертово-поступального руху промивальної рідини у кільцевому просторі ГС і ПС свердловин безпосередньо енергією потоку [1, 2] та можливість регулювання гідродинамічними параметрами й структурою потоку з урахуванням конкретних геологічних та технічно-технологічних умов будівництва певної свердловини на родовищах України, особливо мусять бути враховані ті фактори, що здатні викликати ускладнення в часі буріння свердловин ПС і ГС, умови формування стійкого обертово-поступального потоку неньютонівської рідин, якою є

технологічна рідина, що використовується. Зауважимо, що важливими є усі фактори, що впливають на транспортувальну здатність рідини за різних її реологічних властивостей в часі обертово-поступального руху течії в кільцевому просторі. Отже, є необхідними теоретичні дослідження, що пов'язані з проектуванням та розрахунками спеціальних гідродинамічних елементів у комплексі з компонуванням низу бурильної колони, котрі, власне, й дадуть можливість забезпечити керування технологічними процесами в часі будівництва ПС та ГС свердловин.

Викладення основного матеріалу. За промисловими дослідженнями є відомо, що потоки, котрі володіють стійким обертово-поступальним рухом здатні забезпечити їм високі транспортуючі властивості [6, 7]. Це стосується як ньютоновських так і неньютоновських рідин. Для цього число Фруда (Fr), яке є однією з основних реологічних характеристик рідин, і за своїм порядком визначає відношення кінетичної енергії рідини до приросту енергії зумовленої роботою сил тяжіння на шляху, що дорівнює характерній довжині, повинно бути не меншим від 1, для неньютоновської рідини, якою, власне, є бурова промивальна рідина. За такого значення сили в'язкості відіграють стабілізуючу роль і для ньютоновської рідини мінімальне значення критерію Рейнольдса (Re) складає 45, оскільки він пов'язаний пропорційно з обертовою швидкістю потоку в обмеженому просторі. Для неньютоновської рідини мінімальне значення критерію Рейнольдса є $Re > 20$, але тут функціональний зв'язок між ньютоновською і неньютоновською рідинами є параболічним [8]. Потік рідини з поступально-обертовим рухом, у структурі котрої є, до прикладу, подрібнена порода, може розглядатися з деяким наближенням як «тверде тіло», а тому й може описуватися, у деяких випадках, з погляду властивостей твердого тіла.

Такі умови можуть досягатися у випадку, якщо розподіл осьової швидкості потоку під час входу у гідродинамічний генератор відбувається за параболічним законом, тоді на виході створюються такі умови, що обертова складова швидкості є більшою від осьової за степеневим законом розподілу [9]. У такому випадку інерційні сили переважають над силами в'язкості, а масові сили консервативно впливають на потік. Зокрема, структура біополімерних промивальних рідин, які останнім часом широко застосовуються при бурінні ПС і ГС, включає в себе органічні та неорганічні компоненти, тому і може з певним наближенням, під час розроблення наукових основ динаміки промивальних рідин у затоплених потоках розглядатися з погляду властивостей квазітвердого тіла [9].

Характеристики коливань, що збуджуються у потоці, із застосуванням гідродинамічних пристроїв, котрі конструюють, до прикладу, у компонуванні низу бурильної колони, найбільш повно здатні описуватися амплітудно-частотними (АЧХ) та фазово-частотними характеристиками (ФЧХ) [6].

Зокрема, пропонується, що безрозмірні рівняння руху та неперервності потоку можуть мати вигляд:

$$\frac{\partial \langle \bar{u} \rangle}{\partial \bar{t}} = \left(\frac{L}{\bar{r} R^2 a} \right) \partial \left\{ \bar{r} \left[\left(\frac{\partial \langle \bar{u} \rangle}{\partial \bar{r}} \right) \nu - \left(\frac{R}{g_0} \right) \langle u' v' \rangle \right] \right\} \partial \bar{r} - \left(\frac{1}{\alpha} \right) \frac{\partial \langle \bar{p} \rangle}{\partial \bar{x}}, \quad (1)$$

$$\left(\frac{1}{\alpha} \right) \frac{\partial \langle \bar{p} \rangle}{\partial \bar{t}} + \frac{\partial \langle \bar{v} \rangle}{\partial \bar{r}} + \left(\frac{\bar{v}}{\bar{r}} \right) + \frac{\partial \langle \bar{u} \rangle}{\partial \bar{x}} = 0, \quad (2)$$

тут $\langle \bar{u} \rangle = \frac{\langle u \rangle}{U_0}$, $\langle \bar{v} \rangle = \frac{\langle v \rangle}{U_0}$ – безрозмірні усереднені складові осьової та радіальної

швидкості відповідно (вони включають як турбулентні, достатньо високочастотні, так і вимушені низькочастотні коливання); U_0 – середнє значення швидкості потоку в трубі; u', v' – турбулентні

пульсації швидкості вздовж вісі та по радіусу; ν – кінематична в'язкість рідини; $\langle \bar{p} \rangle = \frac{\langle p \rangle}{p_0}$ –

безрозмірний тиск; p_0 – середній тиск в трубі; $\bar{t} = \frac{ta}{L}$ – безрозмірний час; $\bar{r} = \frac{r}{R}$, $\bar{x} = \frac{x}{L}$ –

безрозмірні координати по радіусу і вздовж вісі труби; $\alpha = \frac{\rho U_0 a}{p_0}$ – приведений опір рідини в трубі;

ρ – густина рідини.

Для виключення з рівності (1) пульсаційних складових швидкості u' та v' застосовуємо гіпотезу Буссінеска, про зв'язок дотичного турбулентного напруження τ_r з градієнтом швидкості вздовж радіусу, зокрема:

$$\tau_r = -\rho \langle u'v' \rangle = \rho v_T \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial r}, \quad (3)$$

з урахуванням котрого рівняння (1) буде мати вигляд:

$$\frac{\partial \langle \bar{u} \rangle}{\partial t} = \left(\frac{L}{\bar{r} R^2 a} \right) \frac{\partial \left[\bar{r} (v + v_T) \frac{\partial \langle \bar{u} \rangle}{\partial \bar{r}} \right]}{\partial \bar{r}}, \quad (4)$$

тут v_T – коефіцієнт турбулентної в'язкості.

Зручно розділити усі змінні на дві складові: на середні значення параметрів, що встановилися й малі періодичні збурення (варіації). Тоді можемо записати:

$$\langle \bar{u} \rangle = \bar{u} + \delta \bar{u}, \quad \langle \bar{v} \rangle = \bar{v} + \delta \bar{v}, \quad \langle \bar{p} \rangle = 1 + \delta \bar{p}, \quad (5)$$

тут $\bar{u} = \frac{u}{U_0}$ – безрозмірне стаціонарне значення поздовжніх складових швидкості;

$\bar{v} = \frac{v}{U_0}$ – безрозмірне стаціонарне значення радіальної складової швидкості; $\delta \bar{u} = \frac{\delta u}{U_0}$ –

безрозмірна варіація поздовжньої складової швидкості; $\delta \bar{v} = \frac{\delta v}{U_0}$ – безрозмірна варіація радіальної

складової швидкості; $\delta \bar{p} = \frac{\delta p}{p_0}$ – безрозмірна варіація тиску.

Задля отримання рівнянь, що описують розподіл коливань у тракті, шукаємо часткові періодичні розв'язки системи рівнянь (2) і (4) у такому вигляді:

$$\delta \bar{u} = \delta \bar{u}_a e^{(i\omega t)}; \quad \delta \bar{v} = \delta \bar{v}_a e^{(i\omega t)}; \quad \delta \bar{p} = \delta \bar{p}_a e^{(i\omega t)}, \quad (6)$$

тут $\bar{\omega} = \frac{\omega L}{a}$ – безрозмірна частота; $\delta \bar{u}_a$, $\delta \bar{v}_a$, $\delta \bar{p}_a$ – безрозмірні амплітуди варіацій

відповідних параметрів, які залежать від $\bar{x}$, $\bar{r}$, $\bar{\omega}$.

Лінеаризувавши рівняння (2) і (4), та підставивши в них співвідношення (5) і розв'язки (6), знаходимо диференціальні рівняння, що пов'язують амплітуди коливань, тиску й складові швидкості вздовж вісі труби відносно радіусу:

$$i\bar{\omega} \delta \bar{u}_a = -\left(\frac{1}{\alpha} \right) \frac{\partial \delta \bar{p}_a}{\partial \bar{x}} + \left(\frac{\bar{L}}{r R^2 a} \right) \frac{\partial \left[\bar{r} (v + v_T) \frac{\partial \delta \bar{u}_a}{\partial \bar{r}} \right]}{\partial \bar{r}}, \quad (7)$$

$$i\bar{\omega} \delta \bar{p}_a + \frac{\partial \delta \bar{v}_a}{\partial \bar{r}} + \frac{\delta \bar{v}_a}{\bar{r}} + \frac{\partial \delta \bar{u}_a}{\partial \bar{x}} = 0. \quad (8)$$

Задля оцінки відносного вкладу кінематичної в'язкості рідини ν та коефіцієнта турбулентної в'язкості ν_T співставляється товщина в'язкого пристінкового шару [1.2,8] $\xi = \frac{30\nu}{u_*}$ та глибина проникнення збурень у потік за коливань в'язкого середовища (в ламінарному пристінковому шарі):

$$\delta = \left(\frac{2\nu}{\omega} \right)^{0.5} \quad (9)$$

тут $u_* = \left(\frac{|\tau_w|}{\rho} \right)^{0.5}$ – динамічна швидкість; τ_w – дотичне напруження на стінці.

Задля оцінки величини τ_w використовуємо зв'язок цього параметру з коефіцієнтом опору λ :

$$\tau_w = \frac{\lambda \rho U^2}{8}, \quad (10)$$

і рівнянням Блязіуса типу:

$$\lambda = \frac{0,316}{\text{Re}^{0,25}}, \quad (11)$$

тут U – середня швидкість у перерізі; Re – число Рейнольдса.

Перетворення рівнянь (7), (8) проводиться введенням змінної:

$$\delta \bar{z}_a = \delta \bar{u}_a + \left(\frac{1}{i \bar{\omega} \alpha} \right) \frac{\partial \delta \bar{p}_a}{\partial \bar{x}}, \quad (12)$$

ураховуючи, що за умови $R \ll L$, $\frac{\partial \delta \bar{p}}{\partial \bar{r}} = 0$, визначається:

$$\frac{\partial^2 \delta \bar{z}_a}{\partial \bar{r}^2} + \left(\frac{1}{\bar{r}} \right) \frac{\partial \delta \bar{z}_a}{\partial \bar{r}} - i s^2 \delta \bar{z}_a = 0, \quad (13)$$

тут $s = R \sqrt{\frac{\omega}{\nu}}$ – безрозмірний параметр, який називають числом Стокса.

Розв'язок рівняння (13) має вигляд:

$$\delta \bar{z}_a = E(\bar{x}, \bar{\omega}) J_0(i^{\frac{3}{2}} \bar{r} s) + F(\bar{x}, \bar{\omega}) Y_0(i^{\frac{3}{2}} \bar{r} s), \quad (14)$$

тут J_0, Y_0 – функції Бесселя; $E(\bar{x}, \bar{\omega})$, $F(\bar{x}, \bar{\omega})$ – невідомі функції.

Ураховуючи, що під час прямування аргументу до нуля, функція Бесселя Y_0 прямує у нескінченність, а амплітуда варіації швидкості $\delta \bar{u}_a$, а отже й $\delta \bar{z}_a$ є обмеженими, тож функція $F(\bar{x}, \bar{\omega}) = 0$.

Враховуючи граничну умову залипання пристінкового шару $\delta \bar{u} = 0$ за умови $\bar{r} = 1$, знаходимо співвідношення для функції $E(\bar{x}, \bar{\omega})$, а відповідно для амплітуд варіації $\delta \bar{z}_a$:

$$\delta \bar{z}_a = \left(\frac{1}{i \bar{\omega} \alpha} \right) \left[\frac{J_0(i^{\frac{3}{2}} \bar{r} s)}{J_0(i^{\frac{3}{2}} s)} \right] \frac{\partial \delta \bar{p}_a}{\partial \bar{x}}, \quad (15)$$

та варіації швидкості:

$$\delta \bar{u}_a(\bar{x}, \bar{r}, \omega) = - \left(\frac{1}{i \bar{\omega} \alpha} \right) \left(\frac{\partial \delta \bar{p}_a}{\partial \bar{x}} \right) \left[1 - \frac{J_0(i^{\frac{3}{2}} \bar{r} s)}{J_0(i^{\frac{3}{2}} s)} \right]. \quad (16)$$

Для аналізу розподілу амплітуд варіацій швидкості й тиску, до прикладу, по довжині свердловини, вводимо середню за перерізом амплітуду варіації швидкості:

$$\delta \bar{U}_a(\bar{x}, \bar{\omega}) = \left(\frac{1}{\pi} \right) \int_0^1 2 \pi \bar{r} \delta \bar{u}_a(\bar{x}, \bar{r}, \bar{\omega}) d\bar{r}, \quad (17)$$

котра з допомогою співвідношення (16) набуде виду:

$$\delta \bar{U}_a(\bar{x}, \bar{\omega}) = - \left(\frac{1}{i \bar{\omega} \alpha} \right) \left(\frac{\partial \delta \bar{p}_a}{\partial \bar{x}} \right) \left[1 - \frac{2 J_1(i^{\frac{3}{2}} s)}{i^{\frac{3}{2}} s J_0(i^{\frac{3}{2}} s)} \right], \quad (18)$$

тут J_1 – функція Бесселя першого роду першого порядку.

Якщо ввести параметр β , що визначається залежністю:

$$\left(\frac{1}{\beta^2} \right) = \left(\frac{2}{i^{\frac{3}{2}} s} \right) \left[\frac{J_1(i^{\frac{3}{2}} s)}{J_0(i^{\frac{3}{2}} s)} \right] - 1, \quad (19)$$

То рівняння руху (18) кінцево набуде вигляду:

$$\delta \bar{U}_a = \left(\frac{1}{i\bar{\omega}\alpha} \right) \left(\frac{1}{\beta^2} \right) \frac{\partial \delta \bar{p}_a}{\partial \bar{x}}. \quad (20)$$

Провівши з рівністю неперервності (8) аналогічні перетворення що й з рівністю (7), та врахувавши граничні умови на пристінковому шарі, отримується співвідношення:

$$\delta \bar{p}_a = \left(\frac{\alpha}{i\bar{\omega}} \right) \frac{\partial \delta \bar{U}_a}{\partial \bar{x}}. \quad (21)$$

Виключивши зі співвідношень (20) та (21) амплітуду варіації тиску, отримується рівняння, що визначає розподіл амплітуд коливань середньої швидкості по довжині потоку, до прикладу, свердловини:

$$\frac{d^2 \delta \bar{U}_a}{d\bar{x}^2} - \beta^2 \bar{\omega}^2 \delta \bar{U}_a = 0. \quad (22)$$

Оскільки, корені характеристичного рівняння (22) дорівнюють $\pm \beta \bar{\omega}$, його розв'язок буде мати вигляд:

$$\delta \bar{U}_a = C e^{(\beta \bar{\omega} \bar{x})} + D e^{(-\beta \bar{\omega} \bar{x})}. \quad (23)$$

Підставивши розв'язок (23) у (21), знаходиться розв'язок для амплітуди варіації тиску:

$$\delta \bar{p}_a = i\beta\alpha \left[C e^{(\beta \bar{\omega} \bar{x})} - D e^{(-\beta \bar{\omega} \bar{x})} \right]. \quad (24)$$

Для визначення констант C та D формулюються граничні умови, до прикладу, для вибою та устя свердловини:

$$\bar{x} = 0; \quad \delta \bar{p}_a = \Psi_0 \delta \bar{U}_a + \gamma_0 \delta \bar{y}_0, \quad (25)$$

$$\bar{x} = 1; \quad \delta \bar{p}_a = \Psi_1 \delta \bar{U}_a + \gamma_1 \delta \bar{y}_1, \quad (26)$$

тут Ψ_0, Ψ_1 – відповідно вхідний та вихідний імпеданси; γ_0, γ_1 – коефіцієнти підсилення для зовнішніх збурень на вході $\delta \bar{y}_0$ й на виході $\delta \bar{y}_1$ потоку.

Підставлення розв'язків (23) і (24) у граничні умови (25) та (26) дає можливість визначити коефіцієнти C та D , після чого віднаходяться співвідношення, що зв'язують коливання швидкості і тиску в довільному перерізі, до прикладу, свердловини за відомої частоти коливань:

$$\delta \bar{U}_a(\bar{x}, \bar{\omega}) = \left(\frac{\gamma_1}{B} \right) \left[(\alpha_n - \Psi_0) e^{(\beta \bar{\omega} \bar{x})} + (\alpha_n + \Psi_0) e^{(-\beta \bar{\omega} \bar{x})} \right] \delta \bar{y}_1 -$$

$$- \left(\frac{\gamma_0}{B} \right) \left\{ (\alpha_n + \Psi_1) e^{[\beta \bar{\omega} (1-\bar{x})]} + (\alpha_n - \Psi_1) e^{[-\beta \bar{\omega} (1-\bar{x})]} \right\} \delta \bar{y}_0; \quad (27)$$

$$\delta \bar{p}_a(\bar{x}, \bar{\omega}) = \left(\frac{\alpha_n \gamma_1}{B} \right) \left[(\alpha_n + \Psi_0) e^{(-\beta \bar{\omega} \bar{x})} - (\alpha_n - \Psi_0) e^{(\beta \bar{\omega} \bar{x})} \right] \delta \bar{y}_1 -$$

$$- \left(\frac{\alpha_n \gamma_0}{B} \right) \left\{ (\alpha_n + \Psi_1) e^{[\beta \bar{\omega} (1-\bar{x})]} - (\alpha_n - \Psi_1) e^{[-\beta \bar{\omega} (1-\bar{x})]} \right\} \delta \bar{y}_0; \quad (28)$$

тут $B = (\alpha_n + \Psi_0)(\alpha_n - \Psi_1) e^{(-\beta \bar{\omega})} - (\alpha_n - \Psi_0)(\alpha_n + \Psi_1) e^{(\beta \bar{\omega})}$; $\alpha_n = -i\alpha\beta$ – приведений хвильовий опір.

Рівняння (27) та (28) дають можливість визначити хвильові характеристики турбулентного потоку рідини, до прикладу, у кільцевому каналі простору в свердловині за стійкого обертового-поступального руху.

У часі проведення розрахунків використовувалися дані реальних умов буріння, зокрема $P = 3 \text{ МПа}$; вхідні й вихідні характеристики тракту генератора включають розміри вхідних і вихідних камер генератора, для яких розхід рідини становить $Q = 36 \text{ л/с}$, а співвідношення

хвильового опору становило $\frac{2\Delta p_1}{\rho U_0 a} = 2,55$, для полімерної рідини «Біокар».

На рисунку 1 наведено результат визначення хвильових характеристик тракту (АЧХ) генератора і зсуву фаз між амплітудами коливань (ФЧХ), звідки видно як залежно від амплітудо-

частотних (а) та фазово-частотних (б) характеристик генератора змінюються енергетичні характеристики потоку, до прикладу, в кільцевому просторі свердловини.

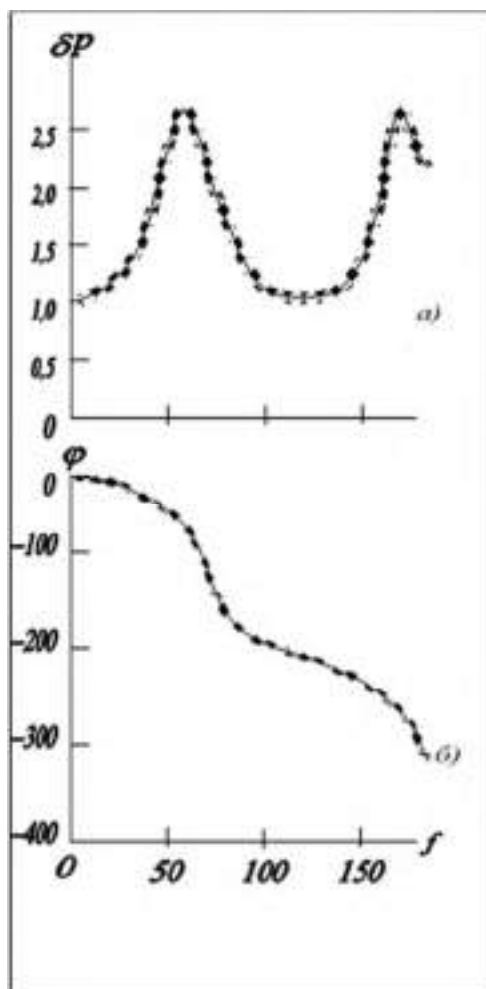


Рис. 1. Амплітудно-частотні (а) і фазово-частотні (б) характеристики тракту потоку

Наявність резонансних піків дає можливість визначити межі таких амплітуд і частот, за яких робочі характеристики генератора будуть давати стійкий турбулентний потік.

Висновки: Підвищення ефективності буріння похило-скерованих і горизонтальних свердловин можливе за рахунок досконалих гідродинамічних циркуляційних процесів промивальної рідини в позатрубному просторі свердловини.

Формування стійкого обертово-поступального руху промивальної рідини в кільцевому каналі позатрубного простору ПС і ГС здатне забезпечитися енергією самого потоку, енергетичні характеристики якого залежать від конструкції та технічних характеристик гідроакустичного генератора, що включається у компоновання низу бурильної колони.

Науково обумовлений вибір характеристик гідродинамічних циркуляційних процесів забезпечує запобігання ускладненням, пов'язаним з порушенням стійкості стінок свердловини, утворенням застійних зон, спричиняючи сепарацію шламу за значного зниження енергозатрат.

Розрахунок параметрів елементів гідродинамічних пристроїв у комплексі з компонованням низу бурильної колони забезпечує можливість керування технологічним процесом, до прикладу, буріння з урахуванням геологічних умов родовищ.

Список використаних джерел:

1. Пат. 251800 UA, МПК E21B10/18 Присрій для буріння свердловин [Текст] /Паневник О.В., Яремійчук Р.С. : № 97031449; заявл. 27.03.1997; опубл. 30.10.1998. 24.
2. Пат. 1754872 A1 SU, МПК E21B10/13 Пристрій для вібраційного буріння свердловин [Текст] / Габрахимов М.С., Хузина Л.Б.: № 9334568; заявл. 20.03.2004; опубл. 20.08.2005.
3. Звіт з оцінки впливу на довкілля Продовження видобування вуглеводнів та спорудження (буріння) свердловин Більського родовища згідно зі спеціальним дозволом на користування надрами № 1803 від 25.03.1999 року. Підключення свердловин до установок

підготовки вуглеводневої сировини АТ «Укргазвидобування». Київ. Нафтогаз. 2025. 532 с. URL chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://oht.sm.gov.ua/images/docs/03.2013/09/29011.pdf>

4. Звіт з оцінки впливу на довкілля Спорудження свердловин № 14 Роднікового родовища, № 1 Східна-Карлівська Веснянського родовища, № 121 Веснянського родовища, № 134 Котелевського родовища, № 134 Машівського родовища та № 200 Західно-Солохівського родовища на газ і конденсат, підземні споруди. Підключення свердловин до установок підготовки вуглеводневої сировини АТ «Укргазвидобування». Київ. Нафтогаз. 2024. 812 с. URL chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://reshsmart.gov.ua/upload/editor/PD7txumAgTp95EZ.pdf>

5. А.Є. Божко, Я.С. Коцкулич, О.В. Кравченко. Монографія. Розробка технологій та технічних засобів для забезпечення надійності постачання вуглеводнів в Україні. Інститут енергетичних машин і систем ім. А. М. Підгорного НАН України. Харків. Нове слово. 2011. 550с. ISBN: 978-617-568-059-9 URL <https://www.old.nas.gov.ua/UA/Book/Pages/default.aspx?BookID=0000005844>

6. Чернова М.Є. Динаміка гідроакустичних коливань у затопленій струмині затрубного простору бурильної колони /Чернова М.Є.// Науковий вісник . – 2013. - № 1 (34). – С 82-88. URL <http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/2471>

7. Судаков А. К., Дзюбик А. Р., Кузін Ю. Л., Назар І. Б., Судакова Д. А. Ізоляція поглинаючих горизонтів бурових свердловин термопластичними матеріалами. Монографія. – Дрогобич.: «Просвіта», 2019. 182 с. URL <http://www.altis-ism.org.ua/index.php/ALTIS/article/view/286/245>

8. Буріння свердловин: навч. посіб. / Є.А. Коровяка, В.Л. Хоменко, Ю.Л. Винников, М.О. Харченко, В.О. Расцветаєв ; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». - Дніпро: НТУ «ДП», 2021. - 292 с. URL <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/14394>

9. Бражененко А.М., Гошовський С.В., Кожевников А.А., Мартиненко І.І., Судаков А.К. Тампонаж гірських порід під час буріння геологорозвідувальних свердловин легкоплавкими матеріалами. - К. УкрДГПІ. 2007. 130 с. URL chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://nasplib.isofts.kiev.ua/server/api/core/bitstreams/223b1639-87b2-4c91-9538-32d852e59507/content>

Рецензент: Андрій ГРИЦАНЧУК, директор науково-дослідного інституту нафтогазової енергетики та екології ІФНТУНГ, к.т.н., доцент, доцент кафедри ВНГ

В.О. Шейченко, Ю.Б. Скоряк, С.А. Скоряк, О.В. Шаповал

Полтавський державний аграрний університет

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВТРАТ ЧЕРЕЗ НЕСВОЄЧАСНЕ ПРОВЕДЕННЯ ПОСІВІВ

Об'єктом дослідження є технологічні процеси вирощування сільськогосподарських культур, порушення термінів посіву, імітаційна модель оцінки можливих втрат через несвоєчасний посів.

Відзначено, що кожна сільськогосподарська культура найбільш реалізує закладений біологічний потенціал за умов створення для її життєдіяльності сприятливих умов. Їх порушення призводить до зменшення врожайності, і, як наслідок, прибутку. В сучасних технологіях виробництва сільськогосподарської культури акценти здійснюють на незаперечному дотриманні рекомендацій щодо вчасного виконання передбачених технологічних операцій.

Імітаційним моделюванням визначено можливі втрати через несвоєчасне проведення посівів окремих сільськогосподарських культур. Із культур ранніх строків сівби проаналізуємо горох, а з культур середніх строків – кукурудзу.

Встановлено, що втрати від несвоєчасного виконання сівби гороха за середньої врожайності 3,5 т/га можуть складати до 30%, або у грошовому еквіваленті 8,14 тис. грн/га. Для кукурудзи втрати від несвоєчасного виконання сівби змодельовано у діапазоні 0-30%. За середньої врожайності кукурудзи 5,0 т/га втрати від несвоєчасного виконання сівби складають за 10% – 4,8 тис. грн/га, 20% – 9,6 тис. грн/га, 30% – 14,4 тис. грн/га.

Ключові слова: терміни сівби, втрати через несвоєчасний посів, імітаційна модель.

V.O. Sheichenko, Y.B. Skoriak, S.A. Skoriak, O.V. Shapoval

SIMULATION MODELING OF LOSSES DUE TO DELAYED SOWING

The object of the study is the technological processes of growing agricultural crops, violations of sowing dates, and a simulation model for assessing possible losses due to untimely sowing.

It is noted that each agricultural crop best realizes its biological potential when favorable conditions are created for its life activity. Violations of these conditions lead to a decrease in yield and, as a result, profit. In modern agricultural production technologies, emphasis is placed on strict adherence to recommendations for the timely performance of the prescribed technological operations.

Simulation modeling has determined the possible losses due to untimely sowing of certain crops. Among early-sown crops, we will analyze peas, and among mid-season crops, corn.

It has been established that losses from untimely sowing of peas with an average yield of 3.5 t/ha can be up to 30%, or in monetary terms, 8.14 thousand UAH/ha. For corn, losses from untimely sowing are modeled in the range of 0-30%. With an average corn yield of 5.0 t/ha, losses from untimely sowing amount to 10% – 4.8 thousand UAH/ha, 20% – 9.6 thousand UAH/ha, 30% – 14.4 thousand UAH/ha.

Keywords: sowing dates, losses due to untimely sowing, simulation model.

Постановка проблеми. Незаперечним є факт, що кожна сільськогосподарська культура найбільш реалізує закладений біологічний потенціал за умов створення для її життєдіяльності сприятливих умов [1, 2]. Їх порушення призводить до зменшення врожайності, і, як наслідок, прибутку. В сучасних технологіях виробництва сільськогосподарської культури акценти здійснюють на незаперечному дотриманні рекомендацій щодо вчасного виконання передбачених технологічних операцій. Саме тому критики осінньо-весняної технології приготування трести стебел конопель відносять затягування збиральних робіт у весняний період до її суттєвого недоліку. Для вчасного проведення збиральних робіт у весняний період у господарств, як правило, не достатньо технічних засобів (котків, граблів, прес-підбирачів, навантажувачів). Цей недолік призводить до необхідності корегування плану проведення посівних робіт. Обробіток ґрунту, підживлення, посів здійснюється із порушенням природно визначених прийнятних термінів.

За традиційною технологією приготування трести з конопляної соломи основний акцент спрямовано на одержання довгого волокна. За таких умов технології збирання й приготування трести взаємозалежні і корелюють між собою. Технологія збирання містить наступні операції: зрізання стебел конопель спеціальними коноплезбиральними машинами секційного типу, розстилення їх у стрічки з паралельним розташуванням відносно один до одного, або із зв'язуванням їх у снопи. Стебла у снопах також розташовують паралельно. Для приготування трести снопи після обмолоту (виділення насінневої частини) розстиляють у стрічки на поверхні ґрунту з метою приготування трести методом росяного мочіння. Як зазначено вище, застосування наведених операцій обумовлено прагненням приготування трести і отриманням з неї як основного продукту – довгого волокна і відходів переробки – короткого волокна [1, 2].

Відома технологія приготування трести, згідно з якою одержують тільки коротке волокно. Зазначена технологія містить наступні технологічні операції: скошування насінневої частини

© В.О. Шейченко, Ю.Б. Скоряк, С.А. Скоряк, О.В. Шаповал

конопель зернозбиральним комбайном. Восени основну частину стебла, що залишилися на полі, скошують біля кореневої шийки та хаотично розстиляють по поверхні ґрунту ґрунтообробними водоналивними котками. Приготування трести здійснюють у осінньо-зимовий період методом виморожування стебел [2].

Збирання трести здійснюють за сприятливих погодних умов у весняний період.

Існуючі теоретичні основи отримання конопляної трести базуються на добре перевірених класичних методах. Розрізняють біологічні, хімічні, фізико-хімічні методи приготування трести та їх комбінації з додатковими фізико-механічними процесами.

Розвиток методів переробки сільськогосподарської продукції викликав суспільно визначений запит та пошук науково обґрунтованих техніко-технологічних рішень у коноплевиробництві. Стрічкова технологія збирання конопель суттєво розширює можливості підвищення ефективності вирощування промислових конопель [1, 5]. На відміну від існуючих технологій збирання й переробки конопель, які переважно орієнтовано на отримання вузького кола продукції (короткого або довгого волокна), які позбавлені можливості максимально, широко використовувати потенціал рослин конопель, запропонована стрічкова технологія уможлиблює напрямки виробництва комбінацій обсягів короткого та (або) довгого волокна. Принцип управління технологічним процесом будуються на врахуванні фізико-механічних характеристик вхідної сировини. Якісні показники волокна, його заокругленість, міцність та вміст лапи визначають способи і режими підготовки стрічки конопляної трести.

Мета дослідження – підвищити ефективність систем виробництва сільськогосподарських культур завдяки визначенню імітаційним моделюванням втрат через несвоєчасне проведення їх посівів.

Задачі досліджень:

– розробити імітаційну модель визначення економічного ефекту від запобігання втрат майбутніх врожаїв внаслідок затримання термінів сівби культури.

Матеріали і методи. Економічний ефект від запобігання можливих втрат майбутніх урожаїв розраховано методом прогнозно-аналітичного їх оцінку за наступних припущень.

Строки сівби залежать від біологічних особливостей культури. До культур ранніх строків сівби відносять овес, ячмінь, пшеницю яру, горох, віку, льон, цукрові буряки, соняшник, тощо. Зазначені культури починають сіяти за температури ґрунту +1 - +6°C [3].

До культур середніх строків сівби відносять кукурудзу, просо, сою, квасолу, сорго, гречку, тощо. Сіють за температури ґрунту +7 - +10°C [3].

Культури пізнього строку сівби (рис, тютюн) сіють за температури ґрунту +12 - +14°C [3].

Запізнення із сівбою часто є причиною появи недружніх і зріджених сходів і, як наслідок, суттєвого зменшення врожаю та погіршення його якості.

Високий врожай з мінімальними витратами енергії формується за умов сівби при сталому прогріванні ґрунту з урахуванням біологічних особливостей кожної сільськогосподарської культури. Через пізню сівбу гороху в 2022 р., викликану війною, отримали середню врожайність 2,6 т/га, тоді як зазвичай збирали від 3 до 4,2 т/га, тобто затримка із сівбою призвела до зменшення врожаю гороху на 14-38,1% [3].

Запізнення із сівбою ярого ріпаку на 5-10 діб призводить до зменшення врожаю на 25-30, а то й до 50%.

Сівба у сухий ґрунт кукурудзи призводить до зменшення врожаю на 10-15%.

Аналіз виконаних досліджень уможлиблює зробити висновок, що за умов прогнозування не завжди враховують той чинник, що система виробництва сільськогосподарської культури, представляє нелінійну складну систему з множиною стохастичних вхідних впливів.

Результати дослідження та обговорення. Економічний ефект визначили за залежністю

$$E_{33} = B_n - B_p, \quad (1)$$

де E_{33} – економічний ефект від запобігання збитків, тис. грн/га; B_n – виручка від реалізації врожаю за умов дотримання визначених технологією термінів проведення сільськогосподарських робіт, тис. грн/га; B_p – виручка від реалізації вирощеного за умов порушення (затримання) рекомендованих термінів проведення сільськогосподарських робіт, тис. грн/га.

В розрахунках прийнято, що всі інші передбачені регламентами технологічні операції у обох сценаріях вирощування культури здійснюють у повному обсязі [4].

Прийmemo, що

$$B_p = K_{вт} \cdot B_n, \quad (2)$$

де $K_{вт}$ – коефіцієнт втрат врожаю внаслідок несвоєчасного (затримання термінів сівби) виконання технологічних операцій (визначають експериментально для кожної сільськогосподарської культури).

Тоді (1) буде мати такий вигляд

$$E_{зз} = B_n \cdot (1 - K_{вт}). \quad (3)$$

Залежністю (3) визначено імітаційну модель, завдяки якій визначають економічний ефект від запобігання втрат майбутніх врожаїв через затримання термінів сівби культури.

Табл. 1.

Фінансові втрати через затримання термінів сівби згідно з імітаційною моделлю

Сільськогосподарська культура	Урожайність, т/га	Ціна, грн/т	Відсоток втрат, %					
			5	10	15	20	25	30
Горох	3,5	7750	1,36	2,71	4,07	5,43	6,78	8,14
Кукурудза	5,0	9600	2,4	4,8	7,2	9,6	12,0	14,4

Застосовуючи імітаційне моделювання визначено можливі втрати через несвоєчасне проведення посівів окремих сільськогосподарських культур. Із культур ранніх строків сівби проаналізовано горох, а з культур середніх строків – кукурудзу (рис.1).

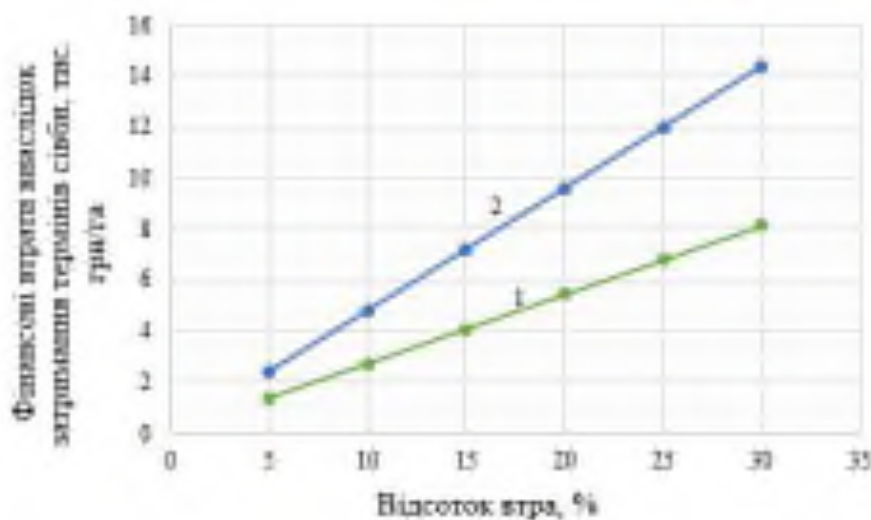


Рис. 1. Залежність збитків через несвоєчасне проведення посівів: 1 – горох; 2 – кукурудза

У табл. наведено результати можливих втрат (збитків) залежно від прийнятого їх відсотку. Для гороха закупівельна ціна прийнята на рівні 7750, для кукурудзи – 9600 грн/т (ціни станом на 01.12.2024 р.). Експертно визначено діапазон відсотка можливих втрат для гороха на рівні не більше 30% із кроком 5%, для кукурудзи – не більше 20% (табл.1).

Встановлено, що втрати від несвоєчасного виконання сівби гороха за середньої врожайності 3,5 т/га можуть складати до 30%, або у грошовому еквіваленті 8,14 тис. грн/га. Для кукурудзи втрати від несвоєчасного виконання сівби змодельовано у діапазоні 0-30%. За середньої врожайності кукурудзи 5,0 т/га втрати від несвоєчасного виконання сівби складають за 10% – 4,8 тис. грн/га, 20% – 9,6 тис. грн/га, 30% – 14,4 тис. грн/га.

Висновки. Розроблено імітаційну модель та встановлено втрати від несвоєчасного виконання сівби гороха за середньої врожайності 3,5 т/га до 30%, або у грошовому еквіваленті 8,14 тис. грн/га. Для кукурудзи втрати від несвоєчасного виконання сівби змодельовано у діапазоні 0-30%. За середньої врожайності кукурудзи 5,0 т/га втрати від несвоєчасного виконання сівби складають за 10% – 4,8 тис. грн/га, 20% – 9,6 тис. грн/га, 30% – 14,4 тис. грн/га.

Список використаних джерел

1. Шейченко В.О., Коропченко С.П., Дудніков І.А., Шевчук В.В., Толстушко М.М., Скоряк Ю.Б., Шейченко Д.В. Основні напрямки розвитку технологій збирання конопель. *Міжвузівський збірник «Наукові нотатки»*. Луцьк. 2023. Вип. №76. С. 202-209.

2. Сівба ярових культур у 2025 році: технології та оптимальні строки. URL: <https://surli.cc/iwwpkv> (дата звернення 05.08.2025).
3. Строки сівби та норма висіву гороху. URL: <https://surli.cc/ifgtug> (дата звернення 05.08.2025).
4. Бойко Г. А., Тіхосова Г. А., Кутасов А. В. Економічна ефективність одержання целлюлозомістких товарів з технічних конопель за різних способів збирання стебел. *Товарознавчий вісник*. 2019. № 12. С. 66–74. В.О.
5. Шейченко, С.П. Коропченко, І.А. Дудніков, Ю.Б. Скоряк, Я.М. Сало, Техніко-технологічні рішення інтенсифікації перероблення конопляної сировини /Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин, 2023, вип. 53, с.85-93. DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.85-93>

О.О. Гончарук, Л.Ф. Головки, О.Д. Кагльак, С.М. Волошко, А.П. Бурмак

*Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»***ТЕРМОДЕФОРМАЦІЙНЕ ЛАЗЕРНЕ СПІКАННЯ АЛМАЗОВІСНИХ
КОМПОЗИТІВ ДЛЯ АБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ ВИРОБІВ МАШИНОБУДУВАННЯ**

Розроблено новий метод термодформаційного лазерного спікання алмазовмісних композитів для абразивного інструменту. Застосовано Ni-Co зв'язку та синтетичні алмази AC125. Встановлено режими лазерної обробки (500–1000 Вт, 0,18–0,36 с), що забезпечують синтез щільного бездефектного шару на сталевій підкладці. Досліджено морфологію межі алмаз/зв'язка та формування карбіду Cr₇C₃, що покращує змочуваність алмазів і зчеплення з матрицею.

Ключові слова: лазер, спікання, алмаз, зв'язка, порошки, композит, структура, фазовий склад

O.O. Honcharuk, L.F. Holovko, O.D. Kahliak, S.M. Voloshko, A.P. Burmak

**THERMO-DEFORMATION LASER SINTERING OF DIAMOND-CONTAINING
COMPOSITES FOR ABRASIVE MACHINING OF MACHINE-BUILDING PRODUCTS**

The main drawback of existing technologies for producing diamond-containing abrasive tools is their low efficiency and the limited number of suitable binder materials for the working layer with filler. This is due to the maximum allowable heating temperatures of diamonds (up to 700–800 °C). The prolonged sintering process, unpredictable tool durability, increased diamond consumption, and high processing cost necessitate the development of new synthesis methods for composites with superhard materials (SHM).

Therefore, this study explores a fundamentally new process of laser synthesis of diamond-containing composite materials for the production of abrasive tools. These tools can be used for grinding large-size sheet products made of carbon fiber, fiberglass, organoplastics, honeycomb panels, and other materials widely used in machine building.

Synthetic diamonds AS125 (grain size 425/300) were used as abrasive grains, while the binder consisted of Ni-based powders (fraction 50 μm) with the addition of Co. Technological equipment equipped with a Maxphotonics 4th-generation fiber laser emitter (λ = 1.06 μm) was employed, along with a set of experimental methods of physical materials science.

As a result of thermo-deformation laser sintering in an inert atmosphere (source power 500–1000 W, exposure time 0.18–0.36 s), a dense, defect-free diamond-containing layer was synthesized on the surface of a steel substrate.

The addition of Co to the Ni-based binder enabled the formation of an extensive contact area with the diamonds and allowed for the analysis of the interfacial morphology between diamond and binder, depending on the irradiation conditions. The optimal laser processing parameters were determined, which ensure the formation of Cr₇C₃ carbide and improved wettability of the diamonds by the binder material.

Keywords: laser, sintering, diamond, binder, powders, composite, structure, phase composition

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розвиток сучасних інтегрованих технологій та тенденція до створення високопродуктивного технологічного обладнання визначають суттєве зростання вимог до техніко-економічних показників абразивних інструментів, оснащених НТМ і, перед усім, до підвищення ресурсу їх роботи та надійності [1].

Основною проблемою є забезпечення міцного закріплення абразивних зерен на робочій поверхні, надання їм ріжучої здатності, яка повинна зберігатися в процесі роботи. До теперішнього часу відомі різні способи закріплення – спікання порошкових матеріалів, заливка розплавленим металом, гальванічне осадження, плазмове напилювання тощо [2, 3]. Доцільність використання лазерного випромінювання для спікання порошкових композиційних матеріалів обговорюється і у багатьох роботах [4–6].

Тим не менш процеси виготовлення абразивного робочого шару та механізми формування сполучного інтерфейсу між металевими сплавами та абразивними зернами все ще потребують подальших ґрунтовних досліджень [7].

Основними проблемами залишаються велика неоднорідність структури інструментального абразивного шару і пов'язані з цим залишкові деформації корпусу інструменту, низька жорсткість у осьовому напрямку, недостатня його зносостійкість, яка зменшується по мірі зменшення товщини інструментального абразивного шару, низька продуктивність процесу спікання [8].

На сьогодні увага приділяється лазерному синтезу композитів Cu/алмаз [9], Ni/Cu/алмаз [10], Al/алмаз [11, 12], Ti/алмаз [13, 14], Ni-Cr [15].

Постановка проблеми дослідження. Добре зрозуміло, що наявність армуючих добавок змінює фізичні властивості металевих матеріалів і, отже, впливає на термічні та реологічні характеристики басейну розплаву. Як наслідок, матеріали з НТМ матимуть іншу технологічність порівняно з монолітними матеріалами, і це факт, який потребує подальших поглиблених

досліджень. Таким чином, відчувається необхідність повного розуміння проблем та перспектив процесів лазерного спікання для виробництва таких матеріалів [16].

Тому метою даної роботи є дослідження впливу різних режимів лазерного синтезу алмазовмісних композитів із матеріалом зв'язки на основі системи Ni-Cr-Co на їх структуру, фазовий та хімічний склад, а також аналіз факторів, які впливають на міцність утримання абразивних зерен зв'язкою.

Викладення основного матеріалу. Експериментальні дослідження процесу лазерного термодформаційного спікання проведено за допомогою технологічного обладнання, оснащеного оптоволоконним лазерним випромінювачем Maxphotonics 4-го покоління.

Синтезований алмазовмісний композит у міру переміщення на відстань 16 – 20 мм від центру зони дії лазерного променя ущільнюється роликом.

У якості абразивних зерен використані синтетичні алмази марки AC125 зернистістю 425/300 (показник статичної міцності зерен 166 Н). У якості зв'язки використовувались порошки на основі нікелю ПГ-12Н-01 (табл. 1) до яких додавався кобальт (90 % від загальної маси порошкової суміші). Порошки мали сферичну форму і розмір 50 мкм.

Зв'язка та зерна синтетичних алмазів (концентрація яких складала 20% від маси зв'язки) механічно змішувались упродовж 3-х годин та наносились на поверхню металевої пластини зі сталі 40Л, розміром 7,6х50х100 мм шаром 5х2,4 мм. Для фіксації зв'язки на поверхні пластини, остання зволожувалась цапонлаком.

Табл. 1.

Хімічний склад зв'язки ПГ-12Н-01

Елемент	Cr	B	Si	Fe	C	Ni
Вміст, ваг. %	8,0-14,0	1,7-2,8	1,2-3,2	2,0-5,0	0,3-0,6	основа

Технологічні параметри лазерної обробки варіювалися в діапазоні: довжина хвилі випромінювання $\lambda=1,06$ мкм, потужність $P=500-1000$ Вт, густина потужності $w=1,77-3,54 \cdot 10^3$ Вт/см², час обробки $\tau=0,18-0,36$ с, швидкість переміщення композиту в процесі лазерного спікання алмазовмісного шару 0,5–1 м/хв, діаметр плями $d=3$ мм, площа плями $S=0,283$ см², фокусна відстань $F=330$ мм (табл. 2). Лазерне спікання алмазовмісних композитів здійснювалося в нейтральному середовищі для запобігання окисненню (кут подачі 45°), витрати аргону складали 20 л/хв. Вибір режимів ґрунтувався на результатах [17].

Табл. 2

Режими лазерного спікання алмазовмісних композитів

№ зразка	v , м/хв	τ , с	P , Вт	$w \cdot 10^3$, Вт/см ²
1	1,00	0,18	1000	3,54
2	0,60	0,30	1000	3,54
3	0,50	0,36	500	1,77

Поверхнева морфологія зразків та хімічний склад досліджувалися з використанням скануючого електронного мікроскопа TESCAN VEGA3 з енергодисперсійним аналізатором.

Рентгеноструктурні дослідження здійснювалися з використанням дифрактометра Rigaku Ultima IV (випромінювання $\lambda_{K\alpha-Cu}$): інтервал кутів $2\Theta = 20^\circ-120^\circ$, крок реєстрації – $0,04^\circ$, час витримки в точці – 2 с, напруга – 40 кВ, сила струму – 40 мА. Для аналізу отриманих рентгенівських спектрів, розрахунку розміру областей когерентного розсіювання (ОКР), ступеню деформації кристалічної ґратки (ε) використовувалося програмне забезпечення PDXL, міжнародна база даних дифракції ICDD (PDF-2 (2025)). Кількісний фазовий аналіз виконувався методом RIR (Reference Intensity Ratio), який полягає у порівнянні відношення інтенсивності найбільш сильних рефлексів фази і корунду в їхній суміші з масовими частками.

У процесі лазерного спікання алмазовмісних композитів із застосуванням широко розповсюджених зв'язок на основі Ni, як правило, практично не можливо забезпечити щільний тепловий контакт на межах алмаз/зв'язка оскільки алмази погано змочуються розплавом зв'язки. Для вирішення цієї проблеми до складу зв'язки ПГ-12Н-01 додавався Со. Як відомо, з метою збільшення міцності утримання зерен алмазів на поверхні інструменту доцільно застосовувати металеві зв'язки, температури плавлення яких перевищують температуру початку графітизації алмазів, тобто > 700 °С. Зв'язка на основі системи Ni-Cr-Co задовільняє цій умові (температура плавлення Со – 1494 °С, Ni – 1455°С, Cr – 1907°С). Структуру та хімічний склад використаної зв'язки ПГ-12Н-01 + Со наведено на рис. 1. Формується евтектична структура, вміст Со складає 41

мас.%, Ni – 39 мас.%, Cr – 4 мас.%. Структура евтектики Ni-Cr-Co складається з твердих розчинів Ni-Cr з ОЦК-граткою та Ni-Co з ГЦК-граткою. У результаті утворюються сильно розгалужені дендрити евтектичних фаз, що взаємно пророщуються в процесі евтектичної кристалізації.

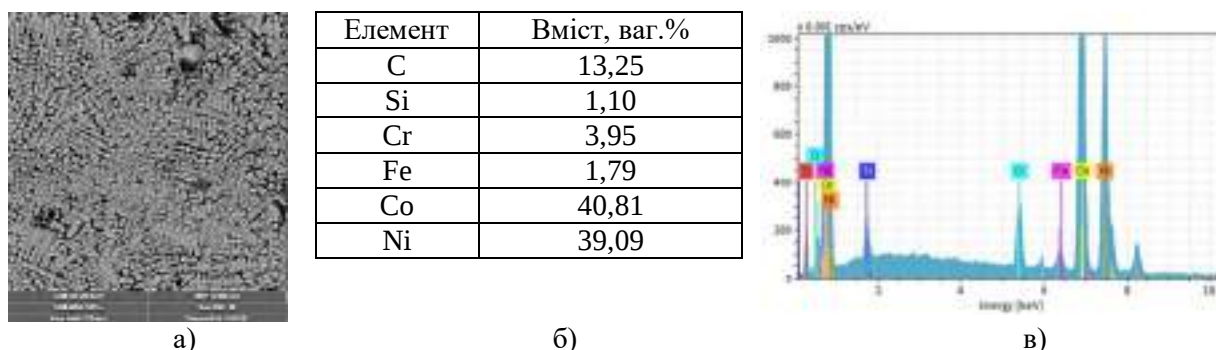


Рис. 1. Структура (а) та хімічний склад (б, в) зв'язки ПГ-12Н-01 + Со

На рис. 2 представлено зображення поверхні отриманих композитів, які містять зерна алмазів, занурених до матеріалу зв'язки. Глибина занурення алмазного зерна відповідає необхідним вимогам (не менше 1/3 від їх розміру). Зразки 1 та 2 розрізняються часом впливу лазерного опромінення, а зразок 3 отриманий за вдвічі меншої потужності і максимального часу опромінення. Варювалась і швидкість переміщення композиту в процесі лазерного спікання, яка вдвічі зменшувалась від зразка 1 до зразка 3.

Для усіх зразків спостерігається щільне охоплення алмазів матеріалом зв'язки без тріщин, пор та інших дефектів. Завдяки додаванню кобальту спостерігається цілком задовільна змочуваність поверхонь алмазів матеріалом зв'язки Ni-Cr-Co. Для зразка 1 характерне найбільш інтенсивне проплавлення порошків із охопленням окремих алмазних зерен матеріалом зв'язки.

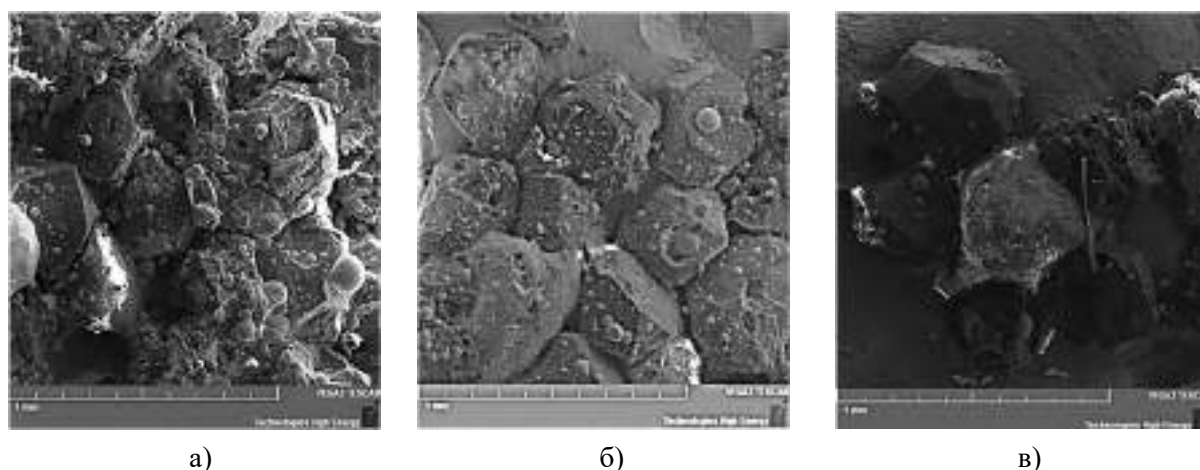


Рис. 2. Морфологія алмазних зерен після лазерного спікання композиту за різних режимів: а) – зразок 1, б) – зразок 2, в) – зразок 3 (табл. 2)

На рис. 3, а наведено зображення окремого алмазного зерна для 1-го зразка із застиглими бризками розплаву. Аналіз карт розподілу хімічних елементів (рис 3, в) свідчить, що під час синтезу відбувається проплавлення підкладки і залізо локально фіксується на поверхні алмазу (позначене жовтим кольором). Спостерігається чітка межа розділу між алмазом та зв'язкою (рис. 3, б), що свідчить про термічну стабільність алмазного зерна. Ця межа має хвилясту морфологію (рис. 3, д, е). Звертає на себе увагу, що в області, яка оточує алмаз, наявний вуглець (рис. 3, з). Це свідчить про можливе формування карбідів та утворення графіту.

Для порівняння на рис. 4 наведено аналогічні результати для зразка 3. На поверхнях алмазу, які виступають над зв'язкою, покриття відсутнє (рис. 4, а), і ріжучі крайки практично відкриті (рис. 4, б). У цьому випадку межа розділу між алмазом та зв'язкою є різкою і має практично лінійний характер. В околі зерна наявності вуглецю майже не спостерігається (рис. 4, в).

Оскільки концентрація Cr є невеликою, зробити однозначний висновок щодо його розподілу на межі алмаз/зв'язка не представляється можливим за даними енергодисперсійного аналізу. Зважаючи на те, що ентальпія утворення карбіду хрому Cr_7C_3 складає -189,5 кДж/моль порівняно, наприклад, із карбідом нікелю Ni_3C (-75,31 кДж/моль), то, цілком ймовірно є формування саме

карбіду хрому. Цей карбід утворюється найчастіше в конструкційних сталях з відносно невисоким вмістом хрому (до 3–4%).

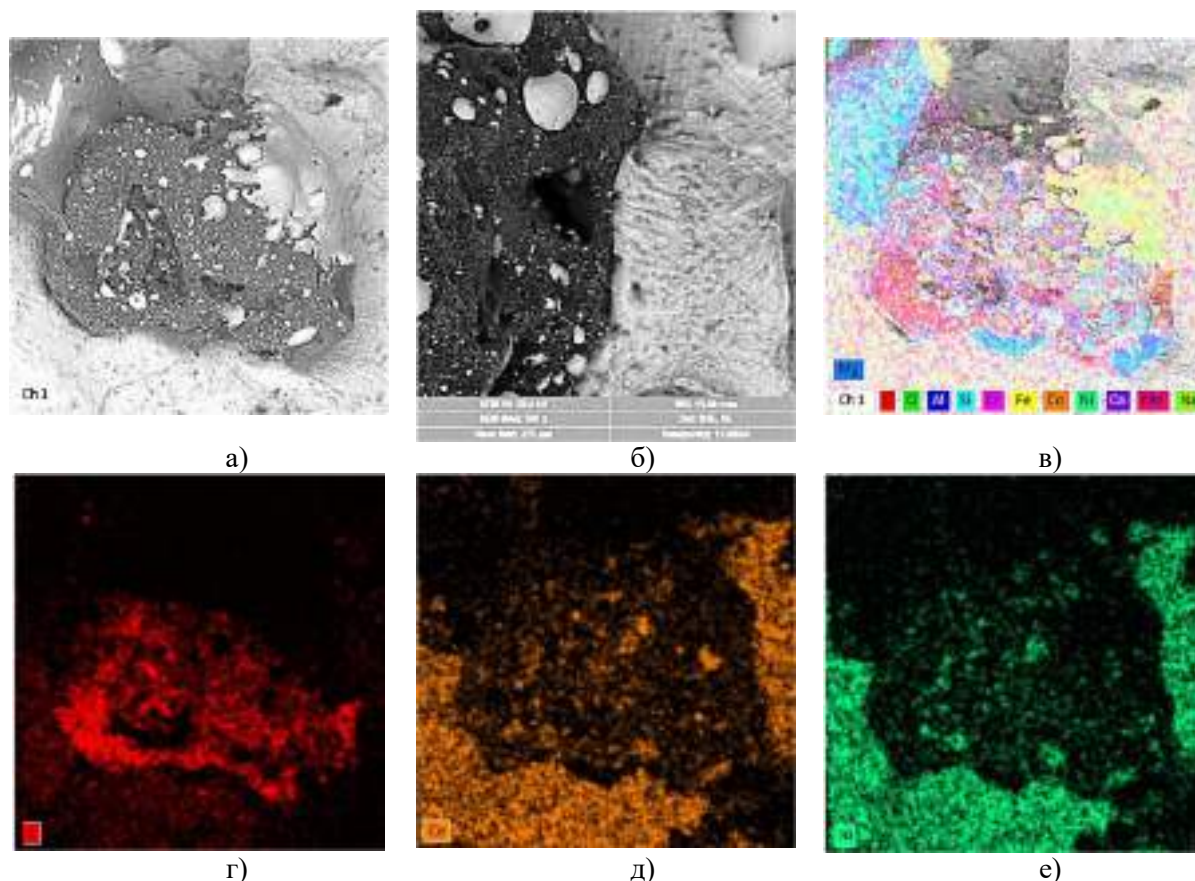


Рис. 3. Морфологія поверхні синтезованого абразивного композиту з алмазом і зв'язкою та карти розподілу хімічного складу (зразок 1)

Для визначення можливості утворення карбідів у зв'язці під час лазерного синтезу проведено фазовий аналіз, результати якого представлено на рис. 5 та в табл. 3. Виявлені дифракційні максимуми від твердих розчинів на основі кобальту (ОЦК), нікелю та хрому (ГЦК), алмазу, графіту та карбіду хрому Cr_7C_3 . Таким чином під час лазерного спікання відбувається дифузійна взаємодія атомів вуглецю з хромом на поверхнях алмазу, що контактують із матеріалом зв'язки, з формуванням карбіду Cr_7C_3 . Згідно [15] механізм зчеплення на межі алмаз/зв'язка інтерпретується так: завдяки хімічній реакції утворюються стовпчасті та голчасті структури карбіду, які забезпечують високоміцний металургійний зв'язок між шаром зв'язки та алмазом.

Результати визначення кількісного фазового складу свідчать, що вміст карбіду хрому Cr_7C_3 у сформованих алмазовмісних композитах є найбільшим (16 ваг.%) для зразка 1 і дещо меншим для зразка 3 (10 ваг.%), що добре узгоджується з результатами хімічного аналізу. Для зразка 2 формування цього карбіду зафіксувати не вдалося, тому вміст алмазів відповідно є найбільшим – 41 ваг.%. Кількість графіту є незначною для всіх зразків і коливається від 2 до 6 ваг.%, тобто деструкції алмазних зерен з виділенням графіту не відбувається.

Розмір ОКР алмазу є найбільшим для зразка 3 і зменшується до 43 нм та 15 нм для зразків 2 і 1, відповідно. Найбільша деформація кристалічної ґратки алмазу на рівні 2% навпаки спостерігається для зразка 1 і зменшується до 0,6% та 0,5% відповідно для зразків 2 та 3. Це також свідчить, що найбільш інтенсивного лазерного впливу зазнає зразок 1. Усадка зв'язки внаслідок плавлення і кристалізації (для сплаву Ni-Cr-Co $\sim 10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$) і лінійне розширення алмазу ($\sim 1 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$) відрізняються на порядок величини. Тому між зв'язкою і зерном алмазу виникають розтягуючі напруження, однак за обраних умов лазерного термодформаційного спікання вдається забезпечити щільне охоплення алмазу матеріалом зв'язки за рахунок утворення проміжного шару карбіду хрому, що покращує змочуваність алмазу матеріалом зв'язки і дозволяє запобігти утворенню тріщин та інших дефектів.

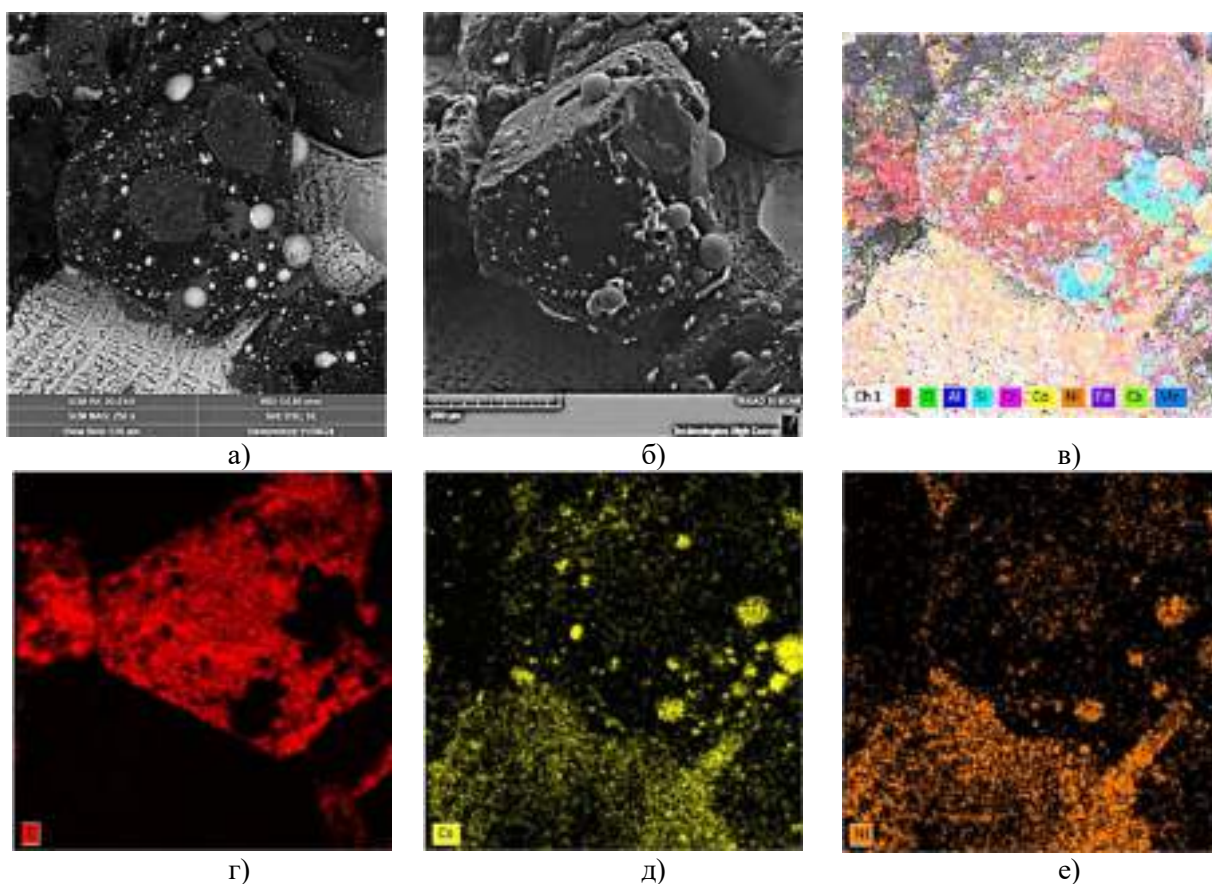


Рис. 4. Морфологія поверхні синтезованого абразивного композиту з алмазом і зв'язкою та карти розподілу хімічного складу (зразок 3)

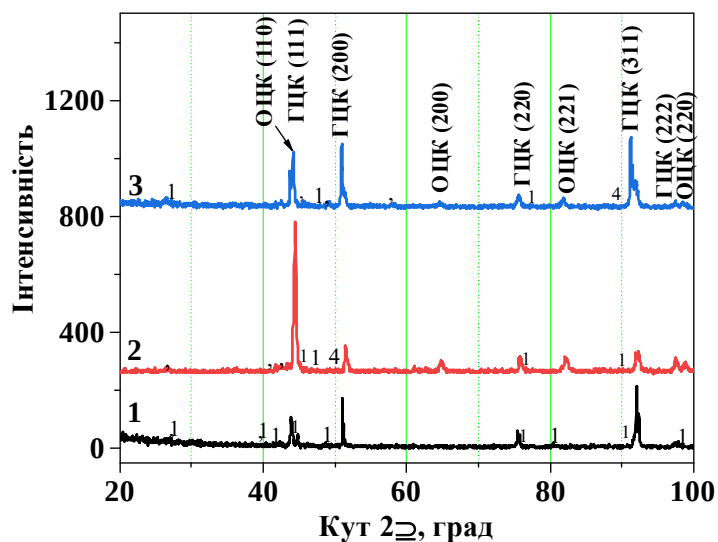


Рис. 5. Фазовий склад синтезованих композитів (Δ – алмаз; $\bullet$ – карбід Cr_7C_3)

Карбід Cr має достатньо велику міцність адгезії до алмазу і при цьому високу теплопровідність. Деформація кристалічної ґратки цього карбиду є меншою для зразка 3 (0,5%) порівняно із зразком 1 (2,24%), так само як і кристалічної ґратки алмазу.

Табл. 3

Результати рентгеноструктурного аналізу

Режим обробки	Фазова складова	Просторова група	a, b , нм	c , нм	ОКР, нм	ϵ , %	Вміст, ваг. %
1	ОЦК	229:Im-3m	0,2915	0,2915	91	0,3	27
	ГЦК	225:Fm-3m	0,3240	0,3240	74	0,11	41
	Графіт	194:P63/mmc	0,2300	0,676	224	3,4	2

	Алмаз	227: Fd-3m	0,3553	0,3553	15	2,05	14
	Карбід хрому	186:P63mc	1,423	0,4030	20	2,24	16
2	ОЦК	229:Im-3m	0,2876	0,2877	202	0,1	32
	ГЦК	225:Fm-3m	0,3552	0,3552	339	0,17	23
	Графіт	194:P63/mmc	0,1930	0,6732	76	0,58	4
	Алмаз	227: Fd-3m	0,3504	0,3504	43	0,62	41
3	ОЦК	229:Im-3m	0,2654	0,2654	28	1,27	34
	ГЦК	225:Fm-3m	0,3715	0,3715	138	0,02	19
	Графіт	194:P63/mmc	0,262	0,6732	154	0,41	6
	Алмаз	227: Fd-3m	0,3558	0,3558	212	0,37	31
	Карбід хрому	186:P63mc	1,404	0,412	58	0,48	10

Висновки

1. Термодетформацийним спіканням з використанням оптоволоконного лазера ($\lambda=1,06$ мкм) потужністю 500–1000 Вт упродовж 0,18–0,36 с на поверхні сталеві підкладки синтезований щільний бездефектний алмазовмісний шар.

2. Додавання Со (90 % від загальної маси порошкової суміші) до зв'язки ПГ-12Н-01 на основі Ні дозволило сформувати щільну розвинену площу контакту з алмазами, морфологія межі розділу алмаз/зв'язка визначається режимами опромінення і змінюється від хвилястої до лінійної.

3. Формування карбіду хрому відбувається для двох режимів обробки – $P=1000$ Вт, $\tau=0,18$ с та $P=500$ Вт, $\tau=0,36$ с. Збільшення тривалості лазерного впливу за енергії 1000 Вт з одночасним зменшенням швидкості подачі порошку перешкоджає процесу карбідоутворенню. Однак, якщо при цьому зменшити енергію лазерного променя вдвічі, то можна сформувати карбід Ст з мінімальною деформацією кристалічної ґратки як цього карбіду, так і алмазного зерна завдяки тому, що коефіцієнт лінійного розширення карбіду Cr_7C_3 має проміжне значення між алмазом та матеріалом зв'язки.

4. Процес карбідоутворення супроводжується зниженням міжфазного натягу між алмазом і зв'язкою, що покращує змочуваність алмазу матеріалом зв'язки.

Подяка

Дослідження фінансується Національним фондом досліджень України, проєкт «Синтез алмазовмісних композитів термодетформацийним лазерним спіканням для абразивної обробки великогабаритних деталей авіа-, судно- та машинобудування» (№ 0124U003940).

Література

1. Singh V. K., Singh N. K., Singh Y. Composites: Modeling and Manufacturing. – Boca Raton: CRC Press, 2024. – 208 с.
2. Vasiliev V., Luchaninov O., Reshetniak O., Strel'nitskij V., Nasieka Iu., Danylenko I., Sabov T., Lementarov V., Horobei O. Tuning of adhesion and hardness of diamond-like carbon vacuum arc coatings by changing the amplitude of pulsed bias potential applied to the substrate // Thin Solid Films. – 2023. – Vol. 783. – Art. 140061.
3. Лавріненко В. І. Сучасні напрацювання в процесах алмазної обробки та особливостях модифікування поверхні алмазних зерен для спрямованої зміни їхніх властивостей (Огляд) // Надтверді матеріали. – 2024. – № 6. – С. 60–83.
4. Zhang J., Wang J., Zhang G., Huo Z., Huang Z., Wu L. A review of diamond synthesis, modification technology, and cutting tool application in ultra-precision machining // Materials & Design. – 2024. – Vol. 237. – Art. 112577.
5. Silva M., Santos N., Pinto M., Guieu S., Oliveira R., Figueira F., Paz F. A. A., Neto M., Rino L., Deuermeier J., Maradiya M., Lieh M., Mendes J. C., Braga S. S. Photochemical modification of a diamond surface using a pulsed UV laser as the energy source // Diamond & Related Materials. – 2024. – Vol. 147. – Art. 111314.
6. Peng Y., Jin T., Yang B., Shi Y., Gao Y., Zhang W. Thermal-mechanical evolution behaviors of metal matrix diamond composite by powder bed fusion-laser beam // Journal of Materials Research and Technology. – 2024.

7. Ding W., Zhao B., Zhang Q., Fu Y. Fabrication and wear characteristics of open-porous cBN abrasive wheels in grinding of Ti-6Al-4V alloys // *Wear*. – 2021. – Vol. 477. – Art. 203786.
8. Long F., He P., Sekulic D. P. Research and Development of Powder Brazing Filler Metals for Diamond Tools: A Review // *Metals*. – 2018. – Vol. 8, No. 5. – Art. 315.
9. Constantin L., Fan L., Pontoreau M., Wang F., Cui B., Battaglia J.-L., Silvain J.-F., Lu Y. F. Additive manufacturing of copper/diamond composites for thermal management applications // *Manufacturing Letters*. – 2020. – Vol. 24. – P. 61–66.
10. Wu Z., Mao A., Wadle L., Huang X., Kraiem N., Silvain J.-F., Cui B., Lu Y. Diamond and Related Materials. – 2024. – Vol. 149. – Art. 111549.
11. Kraiem N. Laser 3D Printing of Diamond-Based Composite Materials for Thermal Management Applications: dissertation. – University of Nebraska-Lincoln, 2024. – (Dissertations and Doctoral Documents, 2023–157).
12. Ma Y., Ji G., Li X. P., Chen C. Y., Tan Z. Q., Addad A., Li Z. Q., Sercombe T. B., Kruth J. P. On the study of tailorable interface structure in a diamond/Al12Si composite processed by selective laser melting // *Materialia*. – 2019. – Vol. 5. – Art. 100242.
13. Fox K., Mani N., Rifai A., Reineck P., Jones A., Tran P. A., Ramezannejad A., Brandt M., Gibson B. C., Greentree A. D., Tran N. 3D-Print Diamond–Titanium Composite: Hybrid Material for Implant Engineering // *ACS Appl. Bio Mater.* – 2020. – Vol. 3. – P. 29–36.
14. Rifai A., Tran N., Reineck P., Elbourne A., Mayes E., Sarker A., Dekiwadia C., Ivanova E. P., Crawford R. J., Ohshima T., Gibson B. C., Greentree A. D., Pirogova E., Fox K. Engineering the Interface: Nanodiamond Coating on 3D-Printed Titanium Promotes Mammalian Cell Growth and Inhibits *Staphylococcus aureus* Colonization // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. – 2019. – Vol. 11.
15. Long F., He P., Sekulic D. P. Research and Development of Powder Brazing Filler Metals for Diamond Tools: A Review // *Metals*. – 2018. – Vol. 8, No. 5. – Art. 315.
16. Dadkhah M., Mosallanejad M. H., Iuliano L. et al. A Comprehensive Overview on the Latest Progress in the Additive Manufacturing of Metal Matrix Composites: Potential, Challenges, and Feasible Solutions // *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. – 2021. – Vol. 34. – P. 1173–1200.
17. Гончарук О. О., Головка Л. Ф., Волошко С. М., Кагляк О. Д., Бурмак А. П., Ключніков Ю. В. Математичне моделювання лазерного синтезу робочого шару абразивного інструмента // *Технологія і техніка друкарства*. – 2024. – № 3(85). – С. 51–68.

М.В. Романенко¹, О.Д. Кагляк¹, В.В. Романенко¹, А.В. Бернацький²

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені
Ігоря Сікорського»¹

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України²

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ГАЗОЛАЗЕРНОГО РІЗАННЯ НЕРЖАВІЮЧИХ СТАЛЕЙ ПОТУЖНИМ ЛАЗЕРНИМ ВИПРОМІНЮВАННЯМ

Розроблено новий методичний підхід для визначення оптимальних швидкостей різання сталевих листів різних товщин. Запропоновано склад, компоновку та конструктивні особливості технологічного обладнання при застосуванні потужного лазерного випромінювання. Досліджено вплив виду та тиску технологічного газу, а також умов фокусування лазерного променя на величину оптимальної швидкості різання нержавіючих сталей для різних діапазонів товщин цих сталей.

Ключові слова: лазер, газолазерне різання, швидкість різання, товщина заготовки, умови фокусування лазерного випромінювання

M.V. Romanenko, O.D. Kagliak, V.V. Romanenko, A.V. Bernatskyi

EXPERIMENTAL RESEARCH OF GAS LASER CUTTING OF STAINLESS STEELS WITH HIGH-POWER LASER RADIATION

The main drawback of experimental studies of the technological process of gas laser cutting of stainless steels of various thicknesses is their sporadic nature and the lack of a unified approach to establishing the relationship between cutting modes and maximum process productivity with satisfactory cut quality.

Therefore, this study examines the influence of the main factors of gas laser cutting, such as different ranges of workpiece thicknesses, variable conditions of laser beam focusing and defocusing, as well as the type and pressure of process gases on the optimal cutting speed of stainless steel sheets.

As a result of such research, general recommendations have been formulated for selecting the optimal cutting modes for stainless steels using powerful 20 kW laser radiation for different ranges of workpiece thicknesses, taking into account various conditions for gas laser cutting, which significantly simplify the selection of the necessary modes for this type of processing.

Keywords: laser, gas laser cutting, cutting speed, workpiece thickness, laser radiation focusing conditions

Постановка проблеми. Застосування сфокусованого лазерного випромінювання з високою концентрацією енергії дає змогу розрізати майже всі метали та сплави, незалежно від їхніх теплофізичних характеристик. При цьому можна отримати тонкі розрізи з мінімальною зоною теплового впливу. Лазерне різання є однією з найпоширеніших технологічних операцій, які виконуються за допомогою лазерів — на цю операцію припадає близько 40-45% усіх промислових застосувань лазерних технологій. Це різання використовують майже в усіх галузях промисловості: від авіакосмічної, суднобудівної та автомобільної промисловості до високоточного приладобудування та медицини. Ця технологія однаково ефективна як для різання великих виробів (наприклад, деталей кузовів, будівельних конструкцій або вузлів літаків), так і для отримання мініатюрних деталей з високою точністю (таких як фільтри, прокладки чи медичні імпланти). Процес, під час якого під дією лазерного випромінювання відбувається нагрівання, плавлення та випаровування металу вздовж лінії різу, а продукти руйнування видаляються потоком допоміжного газу називається газолазерним різанням металів (ГЛР). Тому подальше всебічне вивчення процесу ГЛР є актуальною проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Механізми ГЛР базуються на процесах нагрівання, плавлення, випаровування, хімічних реакціях горіння та видаленні розплавленого матеріалу з області різу. При цьому видалення продуктів руйнування металів з каналу різу полягає в переміщенні рідкої ванни розплаву по товщині матеріалу, тобто уздовж каналу різу, за допомогою динамічного впливу газу [1]. При ГЛР в якості технологічних газів використовується кисень, стиснене повітря, інертний чи нейтральний газ. При газолазерному різанні в залежності від властивостей оброблюваного матеріалу і роду газу, що подається, розрізняють два механізми: хімічний і фізичний.

Хімічний механізм характеризується суттєвим внеском енергії реакції горіння в загальний тепловий баланс. Такий механізм різання зазвичай використовується для матеріалів, схильних до займання і горіння нижче точки плавлення і таких, що утворюють рідкоплинні оксиди. Прикладами можуть бути низьковуглецева сталь і титан. Фізичний механізм полягає в плавленні металу лазерним випромінюванням та видаленні розплаву із зони різання динамічною дією струменю газу. Такий механізм спостерігається зазвичай при обробці металів з малим тепловим ефектом реакції

горіння або металів, що утворюють при горінні тугоплавкі оксиди (леговані, високовуглецеві та нержавіючі сталі, алюміній, мідь та ін.), а також при використанні піддування інертними газами.

При ГЛР металів розрізняють стаціонарний характер руйнування, коли рідка ванна розплаву розташована по всій довжині каналу різку і нестаціонарний, що відрізняється періодичним викидом розплавленого металу із зони обробки. Стаціонарний характер руйнування досягається в тому випадку, коли швидкості плавлення металу в напрямку різки й видалення розплавленого металу в кожному перетині каналу рівні. При менших швидкостях газолазерного різання металів має місце нестаціонарний, тобто несталий, характер руйнування [2, 3].

Використання лазерного різання матеріалів дозволяє розрізати широкий спектр матеріалів, незалежно від їхньої твердості. Лазерне різання майже не чинить механічного впливу на оброблюваний матеріал, що дозволяє працювати з легко деформованими й гнучкими матеріалами. Завдяки цьому немає потреби у жорсткому закріпленні зразка — достатньо розміщення листа, що розрізається, на робочому столі. Висока густина потужності при фокусуванні лазерного випромінювання в зоні різки забезпечує високу продуктивність процесу. Процес легко піддається автоматизації, а застосування координатних систем дозволяє виконувати складні контурні розрізи в двох або навіть трьох вимірах, починаючи різання з будь-якої точки. Можливе багатопозиційне різання, що підвищує гнучкість процесу [4].

До недоліків лазерної різки належать висока вартість обладнання та низький коефіцієнт корисної дії лазерних установок. Однак постійний розвиток конструкцій, нові досягнення в матеріалознавстві, кристалографії, газовому розряді, а також впровадження новітніх оптичних матеріалів дозволяють вважати ці недоліки тимчасовими.

Разом з тим, ГЛР поряд з іншими вуглецевими сталями застосовується для розрізання і нержавіючих сталей. Нержавіюча сталь активно застосовується в будівництві, промисловості та створенні інженерних систем. Вона є основною сировиною для виготовлення таких деталей, як фітинги, фланці, нержавіючі труби тощо. Обробка нержавіючої сталі супроводжується рядом труднощів, зумовлених її властивостями. До основних проблем належать інтенсивне зношування різального інструменту, необхідність безперервного видалення стружки, підвищення щільності матеріалу під час деформації та ін. [5].

Крім високої корозійної стійкості, аустенітна нержавіюча сталь відзначається високою пластичністю, що робить її ідеальним матеріалом для штампованих виробів із глибокою витяжкою та складним рельєфом. Разом з тим, завдяки низькому змісту вуглецю така сталь має поліпшені зварювальні характеристики. Крім того, в такій сталі як 08X18H10T при досить високому вмісті вуглецю для захисту від міжкристалічної корозії застосовується легування титаном, що надає можливість тривалого використання при температурах від 700 до 800 °С. Тому дана сталь активно застосовується в машинобудуванні й нафтохімії [6].

Для виконання операцій із лазерної обробки виробів необхідно створити лазерний технологічний комплекс (ЛТК), який може працювати як самостійно, так і в складі більшого виробничого комплексу. Щоб реалізувати переваги лазерних технологій, зокрема високу швидкість обробки, точність, локалізований вплив на крайках різів, а також забезпечити безпеку роботи, безперебійну експлуатацію, тривалий ресурс та мінімізацію потреби в обслуговуючому персоналі, ЛТК має бути повністю автоматизованим. Якщо ж його застосовують у складі великого виробничого комплексу, він повинен бути ще й роботизованим [7].

До складу автоматизованого ЛТК входять основні системи: технологічний лазер, система транспортування та фокусування лазерного випромінювання, стіл для двох-координатного переміщення заготовки, що розрізається, лазерний технологічний пост, система автоматичного керування [8].

Найбільше застосування в сучасних ЛТК отримали промислові волоконні лазери, які мають незаперечні переваги перед іншими типами лазерів [9]. По-перше, вони не вимагають обслуговування, тому що лазер перебуває в закритому герметичному корпусі, що виключають попадання в них пилу та бруду. По-друге, волоконні лазери є самими надійними серед усіх наявних типів лазерів і мають досить великий ресурс роботи. По-третє, вихідне випромінювання волоконного лазера відрізняється дуже високою якістю й стабільністю параметрів променя. Крім усього перерахованого такий лазер можна використовувати для розкрою матеріалів, що мають високу відбивну здатність для лазерного випромінювання. Це, наприклад, латунь, алюміній, мідь, оцинкована й нержавіюча сталь.

Для ЛТК великої потужності розроблена оптична фокусуюча система, яка піднімає автоматизацію процесу лазерного різання на зовсім новий рівень. Перевагами таких лазерних

оптичних систем, окрім інших, є автоматична установка фокусної відстані, зручне регулювання величини розфокусування, вбудоване спостереження за поверхнею металу, а також автоматичне регулювання положення сопла відносно поверхні заготовки [9].

Визначальним при ГЛР металів є співвідношення товщини розрізуваних листів та швидкості обробки [10-13]. Експериментально досліджувалася також залежності ширини різку, шорсткості його поверхні, а також зона термічного впливу від режимів різання [14-17].

Тим не менш, процеси ГЛР сталевих листів, зокрема нержавіючих сталей, все ще потребують подальших ґрунтовних досліджень в питаннях встановлення оптимальних режимів різки заготовок різних діапазонів товщин при використуванні технологічних газів різних видів та в залежності від тиску, під яким вони подаються в зону різання.

Постановка завдань. При ГЛР нержавіючих сталей лазерним випромінюванням в 20 кВт в плямі фокусування лазерного променя реалізується висока густина потужності, особливо коли енергія, що реалізується в зоні різання ще й доповнюється енергією горіння металу. Потрібне розуміння як керувати цією енергією, щоб при задовільній якості крайок різку, отримати максимальну продуктивність процесу ГЛР.

Тому метою даної роботи є дослідження впливу різних режимів ГЛР на результати обробки та підбір оптимальної швидкості різання нержавіючих сталей різних діапазонів товщин за рахунок реалізації потрібних умов розфокусування лазерного випромінювання та раціонального підбору виду та тиску технологічного (робочого) газу.

Викладення основного матеріалу. Як вказувалось вище, найкращі показники якості поверхні різів можуть бути отримані при різці на максимально можливих швидкостях для листів металу заданої товщини. Таку швидкість будемо вважати оптимальною та позначати – V_{opt} .

В роботі [18] запропонована ступінчата зміна швидкості різання для підбору її оптимального значення для заданої товщини заготовки.

Для знаходження V_{opt} також можна використовувати дві розроблені нами методики. В першому випадку на вибраній заздалегідь швидкості різання V розрізається метал змінної товщини та фіксується глибина різку, коли він ще є наскрізним (рис. 1, а). При цьому робиться висновок, що для даної швидкості різання така товщина металу H_{max} є гранично можливою для отримання наскрізного різку. Таким чином, листи металу товщиною H_{max} для досягнення найбільшої якості та продуктивності ГЛР потрібно різати на заданій швидкості V , і вона є оптимальною (V_{opt}) для цієї товщини (рис. 6, б). Такому підходу слід віддавати перевагу, коли потрібно отримати залежність $H = f(V)$.



Рис. 1. Запропонована методика визначення максимально можливої глибини різку при заданій швидкості ГЛР: заготовка змінної товщини (а), ця ж заготовка з позначенням оптимальної швидкості різання та максимально допустимої товщини різку для такого різання (б)

При встановленні ж залежності $V = f(H)$ потрібний інший підхід, коли ставиться задача визначення максимального значення швидкості різки V_{max} , при якому гарантовано має місце наскрізний різ в листі металу заданої товщини. Для цього лист металу розрізався на змінній швидкості, починаючи від меншого її значення $V_{поч}$, яке гарантувало повне прорізання листа товщиною H , до його більшого значення – $V_{кінц}$, коли повне прорізання такої заготовки вже не мало місця (рис. 2, а). Зафіксоване значення швидкості різку, коли зникає наскрізне прорізання заготовки, і є її шукане оптимальне значення – V_{opt} (рис. 2, б).

Оскільки в подальших наших експериментах нас цікавила залежність оптимальної швидкості різання в залежності від товщини листа металу, то всі подальші експерименти виконувались по представленій другій методиці.



Рис. 2. Запропонована методика визначення оптимальної швидкості ГЛР металевого листа заданої товщини: заготовка, при різанні зі змінною швидкістю (а), ця ж заготовка з графіком зміни швидкості ГЛР (б)

При використуванні потужного лазерного випромінювання в 20 кВт, густина потужності в фокальній плямі випромінювання досягає величини до $5 \cdot 10^7$ Вт/см². Однак, при різанні металів такі значення густини потужності набагато перевищують необхідні значення в $5 \cdot 10^5 - 10^6$ Вт/см², які достатні для досить якісного розрізання листів металу. Тому дуже важливим фактором при різці сталей потужним лазерним випромінюванням, крім величини фокусної відстані лінзи, стає величина та напрям розфокусування лазерного пучка. Так, після фокусування лазерного випромінювання розмір плями пропорційний фокусній відстані лінзи. При фокусуванні лінзою з короткою фокусною відстанню розмір плями є малим, а густина потужності в точці фокусу висока, що дає можливість більш широкого регулювання нею при розфокусуванні. Однак, при цьому зменшується й глибина фокусу, що зменшує запас регулювання. Застосування короткофокусних лінз більше підходить для високошвидкісного різання тонких металів. Довгофокусні об'єктиви мають більшу довжину Релея (глибину чіткості) та достатню густину потужності, що більше підходить для різання товстих заготовок. При ГЛР потужним лазерним випромінюванням в основному використовуються лінзи з фокусною відстанню в 100, 150 та 200 мм.

В залежності від величини розфокусування є можливість отримати різні значення діаметру лазерного променя на поверхні металу, що ріжеться. Відповідно буде змінюватися й густина потужності на цій поверхні. Будемо вважати, що підйом точки фокусу в напрямку фокусувальної лінзи є «позитивним» напрямком і будемо позначати його «+», а віддалення від лінзи та заглиблення точки фокусу в порожнину різу – це «негативний» напрямок, що позначається «-» (рис. 3). Положення плями фокусування відносно до поверхні заготовки безпосередньо впливає на шорсткість поверхні різу, його ширину, а також на адгезію розплавленого залишку продуктів руйнування на нижній поверхні металу, який ріжеться (див. рис. 3). Тож, відносна розташування фокусної точки та поверхні заготовки особливо важливо для забезпечення якості різання нержавіючих сталей. Протягом усього процесу різання забезпечення сталості відносного положення фокуса та заготовки є важливою умовою для отримання стабільної якості різання.

У більшості випадків фокусна позиція знаходиться безпосередньо на поверхні заготовки або трохи нижче поверхні (рис. 3, а). Коли фокус знаходиться в такому положенні, отримуємо різ меншої ширини, а збільшена швидкість різання дає можливість досягти кращих результатів різання. Якщо ж положення плями фокусування занадто заглибити в порожнину різу (рис. 3, б), то це збільшить кількість тепла, що поглинається в області нижньої крайки заготовки. Перегріта нижня поверхня металу гарно змочується, і розплавлений метал буде гарно розтікатися по нижній поверхні в рідкому стані. Після охолодження розплавлений матеріал буде міцно прилипати до цієї нижньої поверхні заготовки у формі куль, створюючи на нижньому краю так званий грат, який значно псує якість отриманої при ГЛР деталі.

Коли ж фокус знаходиться вище поверхні заготовки, то кількість тепла, що виділяється на нижній поверхні розрізаного металу, значно зменшується. Тому метал у порожнині різу не може мати високу рідкоплинність, і грат має вигляд гострих залишків, що прилипають до нижньої поверхні вирізаної деталі (рис. 3, в). Крім того для останньої схеми розфокусування характерно те, що в даному випадку, крім зменшення густини потужності, напряму змінюється час дії лазерного випромінювання в зоні різання. Так, цей час визначається як час проходження лазерним променем діаметру його плями розфокусування зі швидкістю різання. Тобто, при зменшеній густині потужності набагато збільшується час прорізання металу вглиб заготовки, що напряму веде до збільшення товщини листів металу, що розрізаються.

При ГЛР нержавіючих сталей, якщо використовується нейтральний газ, наприклад, азот, газовий струмінь виконує в основному функції з очищення зони різання, а також захисту поверхні

оптичної системи від потрапляння на неї продуктів викиду із зони різання. При використанні ж кисню або стисненого повітря, крім наведених вище функцій, має місце поєднання двох джерел тепла в процесі ГЛР – лазерного випромінювання та екзотермічної реакції горіння металу, що сприяє підвищенню продуктивності обробки [19]. Однак, якість поверхні при різанні великих товщин нержавіючих сталей набагато нижча при використанні кисню, ніж азоту або стисненого повітря за рахунок значного накопичення оксидів та шлаків в нижніх шарах сталі, що веде до значного виділення тепла в цьому місці та, як результат, розширення різів в їх нижній частині.

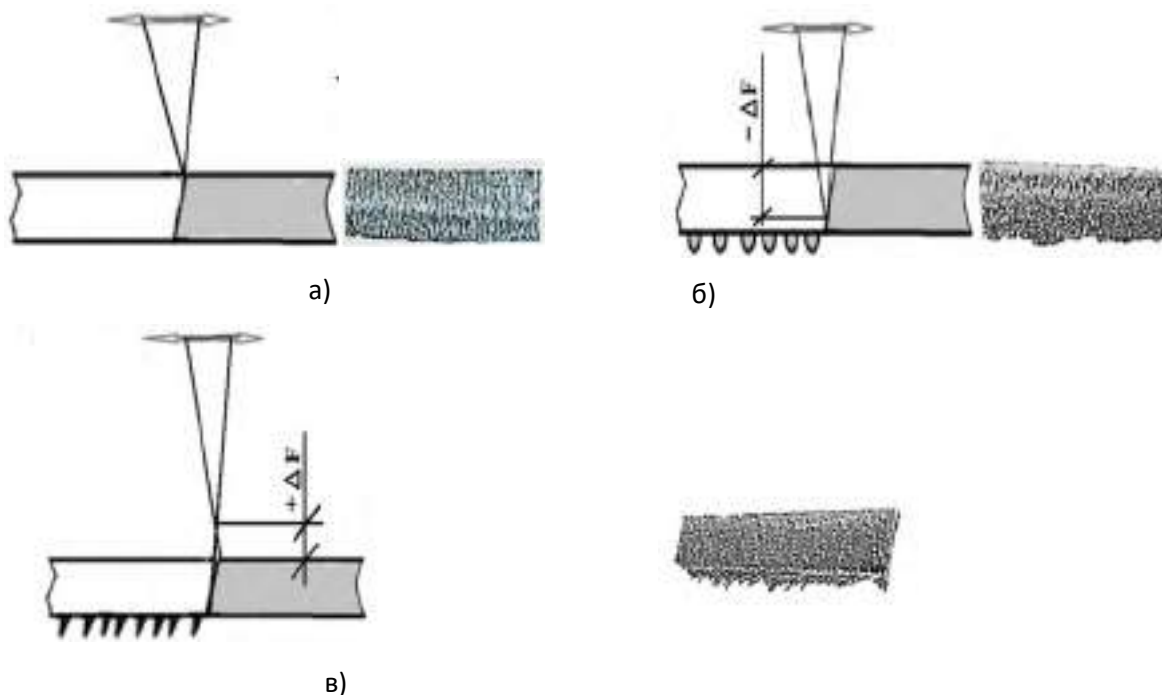


Рис. 3. Умови різання нержавіючих сталей при різних варіантах положення фокусу (зліва) та вигляд поверхні різів в цьому випадку (справа): пляма фокусування на поверхні заготовки або не глибоко всередині порожнини різів (а), розфокусування з заглибленням плями фокусування глибоко всередину порожнини різів (б), розфокусування з розміщенням плями фокусування над поверхнею різів (в)

Разом з тим, застосування стисненого повітря набагато простіше та дешевше у використанні, ніж піддування азоту. При цьому, підвищення тиску азоту до значень, які застосовувалися при використанні стисненого повітря (приблизно до 0,8 — 2,0 МПа) технічно складно, а, головне, набагато дорожче. Однак, при застосуванні азоту крайки різів в нержавіючих сталях мають набагато привабливіший вигляд, ніж при використанні стисненого повітря (рис.4). Тому при виборі робочого газу при ГЛР між азотом та стисненим повітрям звертають основну увагу на те, чи ГЛР – це кінцева операція обробки крайок (тоді застосовують азот), чи після ГЛР крайки будуть підлягати подальшій обробці. Тоді можна використовувати й стиснене повітря. Фото різів в нержавіючій сталі товщиною 5 мм відповідно при використанні азоту та стисненого повітря представлені на рис. 4, а та рис. 4, б.

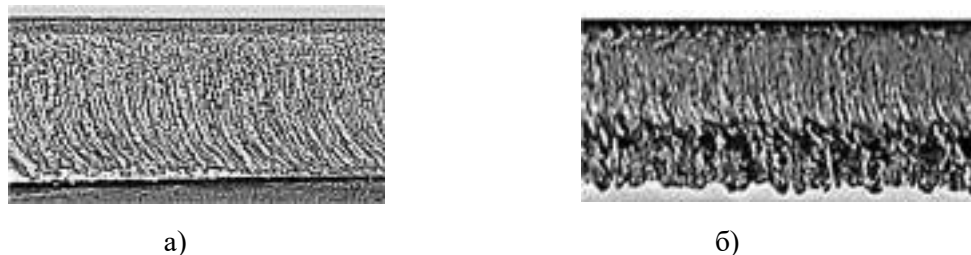


Рис. 4. Фото поверхні різів в нержавіючій сталі товщиною 5 мм: різ при використанні азоту як робочого газу (а), різ при піддуванні стисненого повітря (б)

Проведені експерименти показали, що є відмінність в призначенні режимів різання нержавіючих сталей товщиною від 1 до 10 мм, від 10 до 20 мм, від 20 до 40 мм та від 40 до 100 мм.

Виконані дослідження показали, що швидкості при різанні товщин $1 - 10$ мм та $10 - 20$ мм при використанні азоту або стисненого повітря майже не відрізняються між собою. Відмінність же якісних характеристик отриманих різів прописана нами вище. При цьому інші параметри режимів різки в цьому випадку мають такі значення: для товщин $1 - 10$ мм (1-ий діапазон) – тиск робочого газу повинен мати величину $0,8$ МПа, а лазерне випромінювання повинно бути сфокусоване на верхній поверхні заготовки або при невеликому заглибленні плями фокусування в її середину, тобто величина розфокусування складає $0 - -1$ мм; для товщин $10 - 20$ мм (2-ий діапазон) – тиск дорівнює $1,0$ МПа, а величина розфокусування складає $-1,5 - -7$ мм. Крім того, для останнього діапазону характерним є те, що збільшення товщини металу на 2 мм потребує додаткового збільшення глибини занурення фокусу на -1 мм. На рис. 5 приведена залежність оптимальної швидкості різання нержавіючих сталей при зміні товщини заготовки для двох приведених вище діапазонів цих товщин.

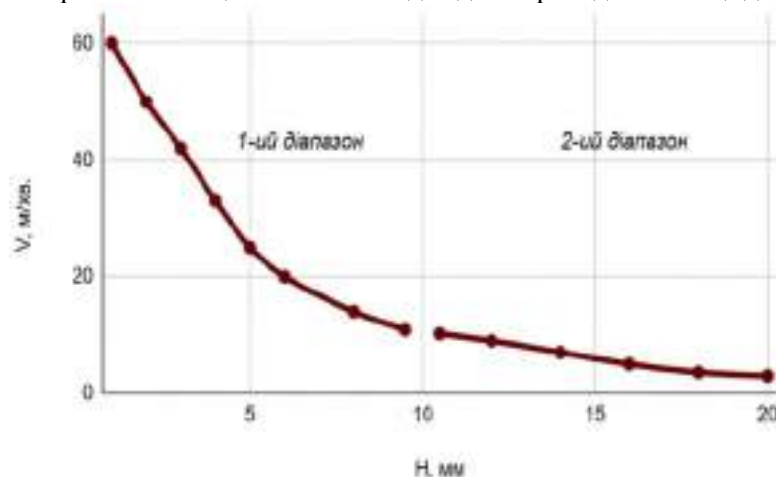


Рис. 5. Залежність оптимального значення швидкості різання нержавіючої сталі від товщини заготовки для перших двох діапазонів режимів при подачі як азоту, так і стисненого повітря

Для великих товщин нержавіючих сталей оптимальні швидкості різання в залежності від товщини заготовки відрізняються для використання стисненого повітря та азоту, а правила занурення фокусу значно змінюються. Так, для товщин $20 - 40$ мм (3-ій діапазон) умови занурення фокусу (як при використанні стисненого повітря так і азоту) такі: загальний діапазон занурення фокусу для таких товщин складає від -10 до -17 мм, а заглиблення потрібно збільшувати на -1 мм при збільшенні товщини заготовки на 5 мм. Тиск піддуваного газу при цьому має оптимальне значення в $1,0$ МПа, не залежно від виду робочого газу.

Для товщин же $40 - 100$ мм необхідно розділяти умови різання при застосуванні стисненого повітря та азоту (4-ий та 5-ий діапазон). Так, оптимальні значення режимів різання для цього діапазону товщин заготовки при використанні стисненого повітря (4-ий діапазон) при його тиску в $1,0$ МПа можуть бути отримані при значному заглибленні плями фокусування в порожнину різу на величину $-16 - -25$ мм, причому діє правило: заглиблення збільшується на -1 мм при збільшенні товщини заготовки на 3 мм. При використанні ж азоту оптимальним є значення тиску в $1,8 - 2,0$ МПа (5-ий діапазон). А ось оптимальними умовами розфокусування є розміщення плями фокусування над верхньою поверхнею заготовки на відстані $+10 - +12$ мм. На таких режимах можливе розрізання заготовок товщиною до 100 мм, тоді як при застосуванні стисненого повітря відносно якісні різі можуть бути отримані в заготовках товщиною не більше 70 мм.

На рис. 6 приведені залежності оптимальних швидкостей різання нержавіючих сталей для великих товщин заготовки в середовищі стисненого повітря та азоту.

В табл.1, для зручності використання, об'єднані всі оптимальні умови реалізації ГЛР нержавіючих сталей різних діапазонів товщин потужним лазерним випромінюванням в 20 кВт.

Таким чином, використовуючи залежності швидкості різання нержавіючих сталей від товщини заготовки, представлені на рис. 5 та 6, а також умови фокусування або розфокусування лазерного випромінювання та оптимальні значення тиску основних типів робочого газу (стиснене повітря та азот), приведені в табл. 1, можна вибрати оптимальні режими ГЛР цих сталей в широкому діапазоні товщин їх листових заготовок.

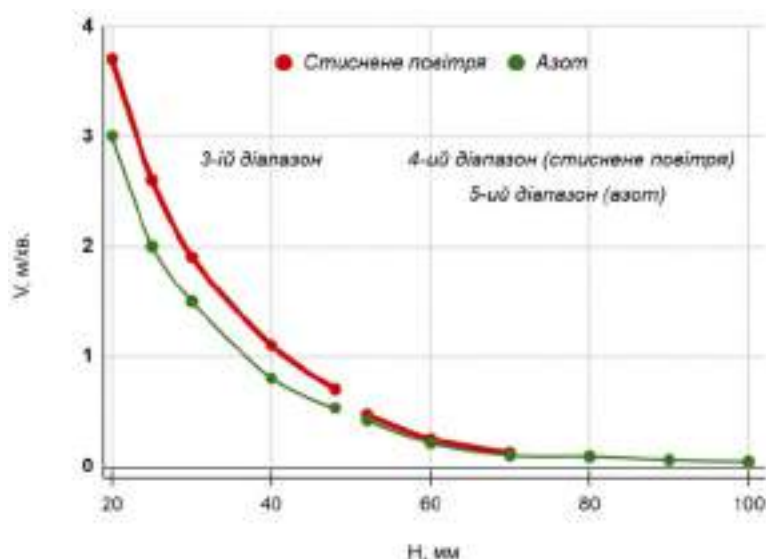


Рис. 6. Залежність оптимальної швидкості різання нержавіючих сталей від товщини заготовки при подачі стисненого повітря та азоту для великих значень товщин заготовок

На рис. 7 приведені фото поверхні різів в нержавіючих сталях для великих товщин заготовок.

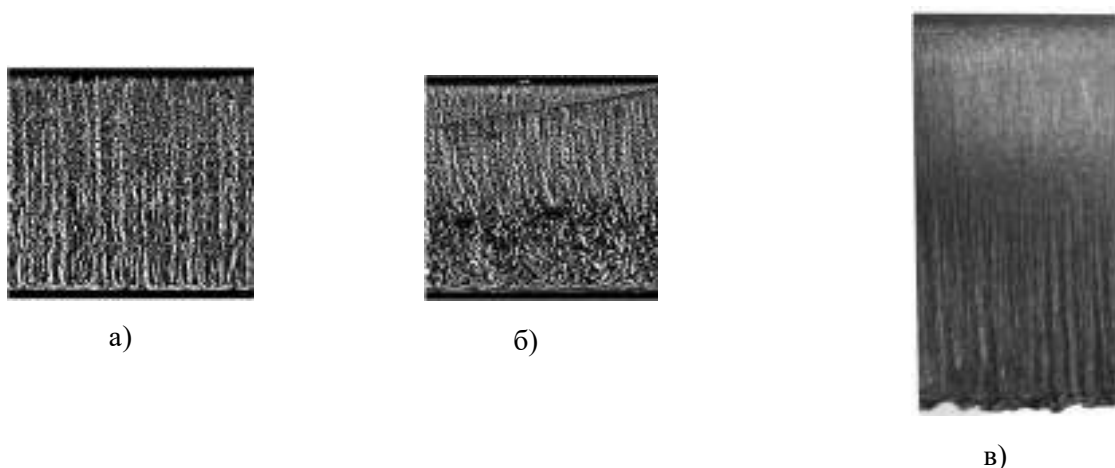


Рис. 7. Фото різів листів нержавіючої сталі великої товщини: різ в сталі товщиною 40 мм при використанні азоту (а) й стисненого повітря (б) та товщиною 80 мм при піддуванні азоту (в)

Висновки. Застосування потужних волоконних лазерів для газолазерного різання металів дає можливість досить високоякісно розрізати сталі, зокрема і нержавіючі, в широкому діапазоні їх товщини при використанні різних умов фокусування лазерного випромінювання та різних видів та тиску технологічних газів. При цьому розроблення оригінальних методик визначення максимально можливих швидкостей різання заготовок потрібної товщини дозволяє отримувати гарантований наскрізний різ в таких заготовках при задовільній якості крайок різів. Представлені фото характерних виглядів лазерних різів для кожного з діапазонів товщин, що показують дієвість та обґрунтованість запропонованої методики отримання оптимальної швидкості різання листів нержавіючих сталей потрібної товщини.

При використанні потужних лазерів для ГЛР важливим фактором стає величина та напрямок розфокусування сфокусованого лазерного випромінювання. Розроблені умови розфокусування потужного лазерного випромінювання при різанні нержавіючих сталей дозволили систематизувати вибір оптимальних режимів ГЛР цих сталей в широкому діапазоні їх товщин. Отримані та проаналізовані залежності оптимальної швидкості різання від товщини заготовки дають можливість, з однієї сторони, розрізати тонкі сталеві листи нержавіючої сталі на швидкостях до 60 м/хв., а, з іншої сторони, збільшити товщину заготовок, що розрізаються, до 80–100 мм.

Табл. 1

Умови вибору оптимальних режимів різання нержавіючих сталей різних діапазонів товщин

Режими різки Діапазон товщин, мм	Вид та тиск робочого газу		Умови фокусування (розфокусування)		
	Тиск стисненого повітря, МПа	Тиск азоту, МПа	Діапазон розфокусування, мм	Правило розфокусування	
				При збільшенні товщини, мм	Приріст величини розфокусування, мм
1 – 10	0,8	0,8	0 – -1	—	—
10 – 20	1,0	1,0	-1,5 – -7	2	-1
20 – 40	1,0	1,0	-10 – -17	5	-1
40 – 70	1,0	—	-16 – -25	—	—
40 – 100	—	1,8 – 2,0	+10 – +12	—	—

Розроблені загальні рекомендації по вибору режимів різання нержавіючих сталей при сумарному використанні графіків залежностей оптимальної швидкості різу від товщини заготовки для різних діапазонів цих товщин та різних умов виконання ГЛР, які зведені в окрему таблицю, що значно спрощують вибір необхідних режимів для ГЛР таких сталей.

Подальші експериментальні дослідження газолазерного різання сталевих листів потужним лазерним випромінюванням дадуть можливість встановити вплив режимів обробки на показники якості крайок отриманих різів.

Список використаних джерел:

1. K. Tamura, R. Ishigami, R. Yamagishi. Laser cutting of thick steel plates and stimulated steel components using a 30 kW fiber laser // J. Nucl. Sci. Technol.— 2016.— Vol. 51. — P. 15-59.
2. J.S. Shin, S.Y. Oh, H. Park, C.M. Chung, S. Seon, T.S. Kim, L. Lee, B.S. Choi, J.K. Moon. High-speed fiber laser cutting of thick stainless steel for dismantling task // Opt Laser. Technol.— 2019.— Vol. 119. — Art.105607.
3. Romanenko V.V. Mechanism of Gas-Assisted Laser Metal Cutting // Laser Technologies in Welding and Materials Processing. — Kiev. — 2003.— Art. — P. 68-70.
4. Sharma A., Yadava V. Experimental analysis of Nd-YAG laser cutting of sheet materials – a review // Opt. Laser Technol. – 2018.— Vol. 98. – P. 264-280.
5. Nagimova A., Perveen A. A review on laser machining of hard to cut materials // Mater Today Proc.— 2019.— Vol. 18. – P. 2440-2447.
6. Rana R.S., Chouksey R., Dhakad K.K., Paliwal D. Optimization of process parameter of Laser beam machining of high strength steels: a review // Mater Today Proc.— 2018.— Vol. 5(9). – P. 191-199.
7. Naresh S., Khatak P. Laser cutting technique: a literature review // Mater Today Proc. – 2022.— Vol. 56(5 SI). – P. 24841-2489.
8. Genna S, Menna E, Rubino G, Tagliaferri V. Experimental investigation of industrial laser cutting: the effect of the material selection and the process parameters on the kerf quality // Appl Sci. – 2020.— Vol. 10(14). – Art. 4956.
9. Основні характеристики лазерного верстата для різання фірми QY Laser. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://ua.qylaser.com>.

10. Anghel C., Gupta K., Jen T.C. Analysis and optimization of surface quality of stainless steel miniature gears manufactured by CO₂ laser cutting // *Optik*. – 20208. – Vol. 203. – Art. 164049.
11. Guarino S., Ponticelli G.S., Venettacci S. Environmental assessment of selective laser melting compared with laser cutting of 316L stainless steel: A case study for flat washers' production // *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.* – 2020. – Vol. 31. – P. 525-538.
12. Mahrle A., Borkmann M., Pfohl P. Factorial analysis of fiber laser fusion cutting of AISI 304 stainless steel: Evaluation of effects on process performance, kerf geometry and cut edge roughness // *Materials*. – 2021. – Vol. 14. – Art. 2669.
13. Girdu C.C., Gheorghe C., Radulescu C., Cirtina D. Influence of process parameters on cutting width in CO₂ laser processing of hardox 400 steel // *Appl. Sci.* – 2021. – Vol. 11. – Art. 5998.
14. A. Sharma, V. Yadava. Experimental analysis of Nd-YAG laser cutting of sheet materials // *Optics & Laser Technology*. – 2018. – Vol. 98. – P. 264-280.
15. Liu Y., Zhang S., Zhao Y., Ren Z. Experiments on the kerf quality characteristic of mild steel while cutting with a highpower fiber laser // *Opt Laser Technol.* – 2022. – Vol. 154. – Art. 108332.
16. Magdum V., Kittur J., Kulkarni S. Surface roughness optimization in laser machining of stainless steel 304 using response surface methodology // *Mater Today Proc.* – 2022. – Vol. 59. – P. 540-546.
17. Li M. Evaluation of the effect of process parameters on the cut quality in fiber laser cutting of duplex stainless steel using response surface method (RSM) // *Infrared Phys Technol.* – 2021. – Vol. 118. – P. 1-7.
18. S. Seon, J.S. Shin, S.Y. Oh, H. Park, C.M. Chung, T.S. Kim, L. Lee, J. Lee. Improvement of cutting performance for thick stainless steel plates by step-like cutting speed increase in high-power fiber laser cutting // *Opt. Laser Technol.* – 2022. – Vol. 103. – P. 311-317.
19. Rajesh K, Murali Krishnam Raju VV, Rajesh S, Sudheer Kumar Varma N. Effect of process parameters on machinability characteristics of CO₂ laser process used for cutting SS-304 stainless steels // *Mater Today Proc.* – 2019. – Vol. 1. – P. 2065-2072.

Рецензент: Л.Ф. Головко, д.т.н., проф.

О.І. Сипягін¹, О. В. Швайкін², В. С. Лопухович³

магістр (інформаційна безпека), інженер повного стека / інженер з інформаційної безпеки, floLive, вул. Бар-Кохва 21, м. Бней-Брак, Телавівський округ, Ізраїль¹
Salesforce Developer, VRP Consulting, США, 268 Bush Street #3836, San Francisco, CA 94104²
magismp, Senior Software Engineer (contractor), Disney Streaming, 3005 Carrington Mill Blvd, Morrisville, NC 27560, USA³

ВПЛИВ СТИСНЕННЯ ДАНИХ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРЯМОЇ ВЗАЄМОДІЇ СЕРВІСІВ У МІКРОСЕРВІСНІЙ АРХІТЕКТУРІ

У сучасних мікросервісних архітектурах, що дедалі частіше реалізуються в умовах високої навантаженості, розподіленого середовища та динамічної масштабованості, спостерігається зростання інтересу до моделей прямої взаємодії між окремими сервісами без використання традиційних проксі-рішень – так званий *proxyless*-підхід. Така модель взаємодії дозволяє зменшити час відгуку системи, уникнути затримок, спричинених проміжною маршрутизацією, оптимізувати інфраструктурні витрати, зменшити кількість потенційних точок відмови й забезпечити більшу архітектурну гнучкість, масштабованість, контроль над потоками даних і відповідність принципам *cloud-native*. У цьому контексті особливого значення набуває впровадження алгоритмів стиснення даних як одного з ключових засобів оптимізації обміну інформацією між сервісами. Стиснення дозволяє істотно зменшити обсяг переданої інформації, знизити навантаження на мережу, мінімізувати затримки в обробці запитів і сприяти зменшенню ресурсоспоживання при інтенсивному міжсервісному трафіку. У статті здійснено теоретичний аналіз впливу застосування стиснення даних на якість, продуктивність і надійність прямого обміну в межах мікросервісної архітектури. Основна увага зосереджена на безвартісних алгоритмах GZIP і Snappy, що є найуживанішими у *cloud-native* середовищах із підтримкою REST і gRPC. Проаналізовано особливості їх інтеграції, залежність ефективності від формату і структури даних, типу API-запитів (одиначних чи масових), а також від рівня мережевої латентності та обчислювального навантаження. Окреслено ключові переваги GZIP у випадках високого навантаження й потреби в глибокому стисненні, а також Snappy – при обмеженнях на затримки і пріоритеті швидкодії. Визначено потенційні обмеження щодо сумісності між сервісами, додаткового навантаження на CPU та конфігураційної гнучкості при ручному керуванні параметрами компресії. Підкреслюється важливість забезпечення узгодженості налаштувань на обох кінцях взаємодії, включно з кодуванням заголовків і підтримкою відповідних форматів. Зроблено висновок, що адаптивний і контекстно-залежний підхід до вибору алгоритму стиснення, з урахуванням характеру API, структури навантаження, топології взаємодії, пріоритетів обробки та мережевих характеристик, є критично важливим для забезпечення стабільної, надійної й ефективної роботи мікросервісів у межах *proxyless*-архітектури сучасних хмарних і гібридних платформ.

Ключові слова: мікросервіси, *proxyless*-архітектура, стиснення даних, GZIP, Snappy, затримка, продуктивність сервісів.

O. Sypiahin, O. Shvaikin, V. Lopukhovych

THE IMPACT OF DATA COMPRESSION ON THE EFFICIENCY OF DIRECT INTERACTION BETWEEN SERVICES IN A MICROSERVICE ARCHITECTURE

In modern microservice architectures, which are increasingly implemented in high-load, distributed environments with dynamic scalability, there is a growing interest in models of direct interaction between individual services without the use of traditional proxy solutions – so-called *proxyless* approaches. This interaction model reduces system response time, avoids delays caused by intermediary routing, optimizes infrastructure costs, decreases the number of potential points of failure, and ensures greater architectural flexibility, scalability, control over data flows, and compliance with *cloud-native* principles. In this context, the implementation of data compression algorithms becomes particularly important as one of the key means of optimizing information exchange between services. Compression significantly reduces the volume of transmitted data, lowers network load, minimizes request processing latency, and helps reduce resource consumption during intensive inter-service traffic.

This paper provides a theoretical analysis of the impact of data compression on the quality, performance, and reliability of direct communication within a microservice architecture. The focus is on lossless algorithms such as GZIP and Snappy, which are among the most widely used in *cloud-native* environments supporting REST and gRPC. The analysis explores the specifics of their integration, the dependence of efficiency on data format and structure, the type of API requests (single or batch), as well as network latency levels and computational overhead. The advantages of GZIP are highlighted for high-load scenarios that require deep compression, while Snappy is preferred in cases with strict latency constraints and a priority on speed. Potential limitations related to service compatibility, CPU overhead, and configuration flexibility when managing compression parameters manually are also identified. The importance of configuration consistency on both ends of service interaction is emphasized, including proper header encoding and support for the required formats.

The conclusion is drawn that an adaptive and context-aware approach to selecting a compression algorithm – considering the nature of the API, the structure of the load, the interaction topology, processing priorities, and network characteristics – is critically important to ensure stable, reliable, and efficient microservice operation within *proxyless* architectures of modern cloud and hybrid platforms.

Keywords: microservices, *proxyless* architecture, data compression, GZIP, Snappy, cloud infrastructure, traffic optimization.

Problem statement. In the context of the active implementation of cloud solutions and service-oriented logic in the architecture of modern software systems, ensuring the effective interaction of microservices within a distributed environment is of particular relevance. The proliferation of proxyless approaches, which involve the rejection of centralized proxy servers, is aimed at minimizing delays, increasing scalability, and reducing infrastructure maintenance costs [1]. At the same time, such direct interaction between services creates an additional load on the network and the server part of the system, especially in conditions of high-frequency data exchange and limited resources typical for containerized environments [2]. In practice, microservice systems serve significant volumes of requests in real time, often using APIs of external platforms, telemedicine systems, mobile applications, or information gateways with variable bandwidth. In such circumstances, one of the most effective approaches to improving the efficiency of inter-service exchange is the implementation of data compression algorithms that reduce traffic, speed up information transfer, and ensure economical use of resources without losing accuracy [3]. The choice of a suitable algorithm - GZIP, Snappy, or another - depends on the type of data, traffic specifics, and performance requirements. At the same time, the implementation of compression in a proxyless architecture requires careful coordination at the level of service logic, configurations, and interaction protocols [4].

Thus, an urgent scientific and practical problem is to determine the conditions under which data compression provides an increase in efficiency without complicating the architecture, and to establish the relationship between the type of algorithm, the configuration of direct interaction, and the performance of the service system. Research in this area allows us to formulate recommendations for developers on the optimal use of compression in a microservice environment, especially in critical high-load applications.

Analysis of recent research and publications. Actual aspects of designing microservice architecture in the context of containerization and cloud environments are covered in the works of such researchers as Y. Katkov, O. Zinchenko, A. Petrenko, A. Fatima, S. Lakkireddy, Z. Lu, X. Sun, X. Merino. These papers address the issues of scalability, resilience, service design, security of microservices interaction, as well as technical challenges associated with limited resources in modern IT infrastructures. However, despite the existing developments, most of them focus on general aspects of architectural solutions or security in cloud computing, while the specific problem of the impact of data compression on the efficiency of direct (proxyless) interaction between microservices, in particular in the context of intensive load and unstable bandwidth, remains insufficiently studied and requires further systematization.

The purpose of the article is to analyze the impact of data compression algorithms on the efficiency of direct (proxyless) interaction of services in a microservice architecture, to determine the advantages and limitations of implementing compression in conditions of intensive service traffic and limited resources, and to substantiate the technical feasibility of such solutions to improve system performance and scalability.

Summary of the main material. In today's environment of rapid development of digital technologies, microservice architecture has become a key element in building scalable and flexible software systems, especially in environments with high load and limited resources. One of the most pressing issues in this context is optimizing proxyless interaction between services by implementing efficient data compression mechanisms. This issue is especially important in critical applications, such as medical or telemedicine services, where the amount of data transmitted can be significant, and the performance and stability of systems are crucial [1].

The main constructive approach to microservice architecture is to divide a monolithic system into separate independent services that interact with each other via APIs. In cases where inter-service communication is carried out directly, without the use of intermediaries (proxies, API gateways), there is a need for efficient network management, message exchange, and data compression. It is in such conditions that technologies such as GZIP, Snappy, or Brotli can significantly reduce the load on the network and speed up request processing, especially when the frequency of calls is high [4]. Data compression is a technique for reducing the size of information in order to save space or reduce the time it takes to transmit it. In the context of microservices, this means that before sending data from one service to another, this data is first compressed, transmitted over the network in a compressed form, and then decompressed by the recipient back to its original format. This interaction scenario will be the subject of further analysis. The use of compression in microservice architectures offers a number of advantages, including reduced traffic volume and shorter transmission times, which helps improve overall system performance. This allows for efficient exchange of large amounts of data, reducing the load on the network, especially in cases of similar or repetitive traffic. Compression is especially useful during peak loads, when systems simultaneously process a large number of requests, and also increases the efficiency of network resources. At the same

time, the use of compression has certain disadvantages. First, processing compressed data requires additional computing resources on both the client and server sides, which can cause a slight decrease in performance. Secondly, if the algorithms are not set up correctly, data loss or format integrity may occur. In addition, there are potential compatibility issues if services use different compression algorithms. Another difficulty is the need for pre-configuration and additional expertise to work with such data, including debugging and auditing of the transfer.

Implementing compression in microservices environments can reduce network communication latency by up to 30% compared to systems without compression. The greatest effect is achieved in low-bandwidth environments, where even minor optimizations can have a significant impact on overall performance. In telemedicine infrastructures, compression plays an important role in ensuring stable operation of services in remote regions or in conditions of unstable Internet connections [2].

Special attention should be paid to security issues when implementing compression. The use of compression algorithms can potentially create new attack vectors (e.g., CRIME or BREACH) if compression is performed on encrypted traffic. In this regard, it is recommended to apply compression only to unencrypted data, followed by encryption of the communication channel using TLS 1.3 [3].

Another key aspect is the choice of the compression algorithm itself. Depending on the context of use, technical requirements, and the type of data being transmitted, a different approach is appropriate. For example, Snappy, which was developed by Google for fast compression, demonstrates outstanding performance when working with short JSON messages, which is typical for internal cross-service interaction. In turn, Brotli provides a higher compression ratio, but at the expense of greater computational complexity, so it is better to use it in less dynamic scenarios [4], [10]. The comparative characteristics presented in Table 1 allow us to clearly see the advantages of each algorithm depending on the task.

Table 1.

Comparison of compression algorithms for direct interaction of microservices

Type of compression algorithm	Description.	Application examples
Lossless compression	Algorithms that allow you to fully restore the original data after compression.	Huffman coding, Lempel-Ziv (LZ77, LZ78), Deflate (GZIP), Snappy (high speed with moderate compression)
Lossy compression (Lossy)	Algorithms that remove secondary information, so accurate recovery of the original data is impossible.	JPEG (image), MP3, AAC (audio, video)

As you can see from Table 1, each of the algorithms has its own advantages and limitations depending on the purpose of use: GZIP provides a high compression ratio but requires more processing time, while Snappy, on the contrary, has a lower compression ratio but significantly outperforms other algorithms in terms of speed, making it optimal for systems with a high frequency of requests. Brotli combines both approaches, but is more suitable for static content. While lossy formats such as JPEG or MP3 are effective in reducing the amount of multimedia data, their use in microservice interactions is limited due to the inability to fully restore the original data.

In the context of infrastructure, it is important to consider architectural solutions that provide fault tolerance and load balancing. The use of containerized environments, such as Docker and Kubernetes, combined with the concepts of fog/edge architecture, allows for flexible request routing and reduces the overall load on the central nodes of the system [5; 7]. Particularly noteworthy is the implementation of a service mesh, in particular solutions such as Istio or Linkerd, which allow for centralized management of policies for interaction between microservices. Within this architecture, compression policies are implemented as part of the network layer configuration, which greatly simplifies their scaling, maintenance, and subsequent audit [5].

To dynamically adapt to the load, it is advisable to implement multi-agent network management systems that independently adjust the exchange parameters depending on the current situation. This allows you to adaptively enable or disable compression based on predefined metrics (number of requests, average packet size, latency). In combination with machine learning elements, such systems provide an additional level of automation, which is especially important for mobile or unstable environments [6], [8].

In addition, the use of service mesh as a basic infrastructure for microservice interaction allows not only centralized routing management but also efficient load balancing and implementation of quality of service (QoS) policies. Traffic compression in such systems is carried out according to the class of service, which optimizes the use of bandwidth and computing resources without losing the quality of interaction [9].

The issue of architecture compliance with reliability and scalability requirements is one of the key issues in the development of modern digital systems, especially in the context of microservice architecture. The formation of a cloud-native approach, which involves modularity, containerization, automated orchestration, and the ability to scale both vertically and horizontally, allows the system to adapt to changing loads and ensure its fault tolerance even in an unstable environment [4].

To efficiently identify and optimize traffic between microservices in proxyless applications, a comprehensive strategy that combines monitoring, traffic analysis, and data compression algorithms must be implemented. The first step is to monitor and analyze requests: using Prometheus and Grafana, you can collect metrics on the frequency of API calls, the amount of data transferred, and response time. Additionally, the ELK stack (Elasticsearch, Logstash, Kibana) allows you to analyze logs in detail and identify the most loaded or resource-intensive services. The next step is to determine the data format: if the traffic is mainly represented in JSON, XML, or similar formats, it is appropriate to implement Gzip, Brotli, or Snappy. It's important to keep in mind that not all APIs require compression - for example, methods like *getOneEntityById* are best left uncompressed, as testing shows that in such cases, compression creates an unnecessary load. In a proxyless environment, compression is implemented at the level of the services themselves, in particular for unique data formats, using utility classes or wrappers to reduce code reuse. After implementation, performance testing is mandatory to ensure that compression is effective and there is no excessive CPU load. Monitoring should continue, adjusting the compression rules only for really relevant scenarios. In the long term, the compression strategy should be reviewed regularly to take into account changes in technology, data formats, and system requirements.

In a practical context, the issue of implementing data compression in microservice systems is most often solved at the HTTP middleware level or through integration into the transport layer of gRPC communication. However, in the context of direct (proxyless) interaction, where there is no centralized traffic controller, the key challenge is to implement compression on the side of each individual service without disrupting the overall interaction. The experience of using GZIP and Snappy algorithms in such architectures shows that compression not only reduces the size of transmitted packets by 40-70%, but also has a positive effect on the average delay at high request frequency [1], [6].

Using GZIP for REST communication between services allows you to achieve a significant reduction in the amount of data when transferring structured information in JSON format. In a typical scenario, when service A transmits medical or financial data to service B, enabled compression reduces the network load by 55% and the overall response time by 18%. Snappy, on the other hand, demonstrates a lower compression ratio, but is superior in speed, making it suitable for scenarios where minimal latency is critical [2].

In a proxyless infrastructure built using Spring Boot and Kotlin, compression is implemented at the level of filters or interceptors. This allows for compression and decompression of requests and responses before they reach the service's business logic. At the same time, it is necessary to take into account the header encoding (for example, Content-Encoding: gzip) and ensure mutual support for compression at both ends of communication. Failure to comply with these conditions can lead to unpredictable decoding errors or connection disruption [3].

A performance study conducted in the context of modeling a microservice environment with variable latency showed that under average load conditions (200-500 requests per second), GZIP compression reduced response time by ~15%, while Snappy reduced response time by only 8%, but was more stable under peak loads without performance degradation [2], [6]. Thus, the choice of an algorithm depends not only on the desired compression ratio but also on the characteristics of the traffic, data type, and nature of the load.

It should be noted that in conditions of high parallelism of request processing, compression should not block the main threads of execution. Therefore, it is advisable to move compression operations to separate worker threads or use asynchronous mechanisms supported by modern frameworks, such as Kotlin Coroutines or Project Reactor. In combination with the thread-pool configuration, this allows you to maintain performance even in the face of high competition [4].

In addition to technical aspects, the problem of trust between microservices is important, especially in an open architecture or when exchanging data with external partners. Building a trust model for a microservice environment involves not only authentication and authorization, but also checking the integrity of the exchange. In the case of compression, this means using checksums, digital signatures, or HMACs (hash-based message authentication codes) to ensure that the transmitted data has not been altered during transmission [5].

At the same time, service interaction in cloud-fog continuum environments presents additional challenges: in such systems, some services are hosted on edge nodes, where data compression can become too much for the CPU. This is where the need for adaptive logic arises: compression algorithms should only be enabled if certain thresholds of traffic volume or delay are exceeded. This is ensured by telemetry

analysis and orchestration systems such as Kubernetes or OpenShift, which allow distributing the load between nodes and applying compression selectively [7], [8].

The role of architectural design is also key in this process. It is important to consider compression at the stage of service contract design - defining a specification that describes what data is transmitted, in what format, and whether compression is supported. Ignoring this aspect at an early stage can lead to incompatibility between services in the future, which will require costly refactoring or API modifications.

Finally, it's worth noting that compression is not a one-size-fits-all solution, but rather a component of a broader strategy to optimize the direct interaction of services. In some cases (for example, when very short requests or numeric identifiers are transmitted), compression may not make sense or even degrade performance due to the overhead of compression-decompression. Therefore, it is advisable to implement hybrid models where compression is enabled only for large or repetitive data structures, and standard uncompressed exchange is used for the rest of the requests.

Conclusions. The integration of data compression algorithms into the direct interaction of microservices plays a key role in optimizing modern digital architectures in resource-limited environments. Ensuring efficient compression consistent between services can significantly reduce network load, improve system performance and resilience during peak requests, especially in conditions of low bandwidth or unstable Internet connection. Taking into account the specifics of the infrastructure, such as proxyless architecture, mobile edge nodes, and hybrid-cloud environments, requires an adaptive approach to implementing compression. Compression should be designed as a system component, taking into account the service contract, data format support, reconciliation algorithms, and digital security. Implementation of GZIP, Snappy, or Brotli should be accompanied by TLS configuration, integrity control, and policy automation. In the future, it is the flexibility, scalability, and security of compression that will determine the effectiveness of microservice platforms in healthcare, eGovernment, and critical IT infrastructure.

References.

1. Катков Ю. І., Зінченко О. В., Березовська Ю. В., Кладько І. М. Особливості сервіс-дизайну мікросервісної архітектури в хмарних обчисленнях в умовах контейнерної віртуалізації. *Наукові записки Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій*. 2024. Вип. 1. С. 47–58. <https://doi.org/10.31673/2786-8362.2024.010707>
2. Петренко А. І., Болобан О. А. Розробка інфраструктури для інтеграції штучного інтелекту в телемедичні системи за допомогою мікросервісної архітектури. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 1. С. 148–158. <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2025.1.14>
3. Fatima A., Kumar C. K., Panjathan S. U., Doss S. The Security Implications of Microservices in Modern Software Development. In: *Data Governance, DevSecOps, and Advancements in Modern Software*. IGI Global Scientific Publishing, 2025. С. 295–320. <https://doi.org/10.4018/979-8-3373-0365-9.ch014>
4. Lakkireddy S. Demystifying Cloud-Native Architectures – Building Scalable, Resilient, and Agile Systems. *Journal of Computer Science and Technology Studies*. 2025. Vol. 7, No. 4. P. 836–843. <https://doi.org/10.32996/jcsts.2025.7.4.97>
5. Lu Z., Delaney D. T., Lillis D. A survey on microservices trust models for open systems. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 28840–28855. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3260147>
6. Sun X., Cui B., Cai Z. Deep Q-Learning Based Circuit Breaking Method for Micro-services in Cloud Native Systems. In: *CCF Conference on Computer Supported Cooperative Work and Social Computing*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023. P. 348–362. <https://doi.org/10.1007/978-981-99-9637-7-26>
7. Merino X., Otero C., Nieves-Acaron D., Luchterhand B. Towards orchestration in the cloud-fog continuum. In: *SoutheastCon 2021*. IEEE, 2021. P. 1–8. <https://doi.org/10.1109/SoutheastCon45413.2021.9401822>
8. Arzo S. T., Bassoli R., Granelli F., Fitzek F. H. Multi-agent based autonomic network management architecture. *IEEE Transactions on Network and Service Management*. 2021. Vol. 18, No. 3. P. 3595–3618. <https://doi.org/10.1109/TNSM.2021.3059752>
9. Duque A. O., Klein C., Feng J., Cai X., Skubic B., Elmroth E. A qualitative evaluation of service mesh-based traffic management for mobile edge cloud. In: *2022 IEEE International Symposium on Cluster, Cloud and Internet Computing (CCGrid)*. IEEE, 2022. P. 210–219. <https://doi.org/10.1109/CCGrid54584.2022.00030>
10. Souza A. Software Design and Architecture. In: *Tech Leadership Playbook: Building and Sustaining High-Impact Technology Teams*. Berkeley, CA: Apress, 2024. С. 87–125. <https://doi.org/10.1007/979-8-8688-0543-1-4>

В.М. Франчук¹, Л.М. Самчук¹, Ю.В. Шишко²Луцький національний технічний університет¹Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»²

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ЗВАРЮВАННЯ ДЛЯ АВТОМОБІЛЬНОЇ ГАЛУЗІ

У статті розглянуто сучасні методи зварювання в автомобілебудуванні, зокрема такі технології, як дугове зварювання (MMA, MIG/MAG, TIG), зварювання під флюсом, електрошлакове та плазмове зварювання. Проведено аналіз їхніх технічних характеристик, переваг і недоліків, а також особливостей застосування в контексті вимог до якості, надійності та економічної ефективності з'єднань. Визначено, що вибір оптимальної зварювальної технології залежить від матеріалу, конструкції та призначення деталей, а впровадження інноваційних методів сприяє підвищенню якості та конкурентоспроможності автомобільної продукції.

Ключові слова: Зварювальні технології, автомобільне зварювання, ефективність виробництва, міцність конструкцій.

V.M. Franchuk, L.M. Samchuk, Y.V. Shyshko

ANALYSIS OF WELDING TECHNOLOGIES FOR THE AUTOMOTIVE INDUSTRY

The article discusses modern welding methods in automotive engineering, in particular technologies such as arc welding (MMA, MIG/MAG, TIG), submerged arc welding, electroslag welding and plasma welding. An analysis of their technical characteristics, advantages and disadvantages, as well as the specifics of their application in the context of requirements for quality, reliability and economic efficiency of joints is carried out. It has been determined that the choice of the optimal welding technology depends on the material, design and purpose of the parts, and the introduction of innovative methods contributes to improving the quality and competitiveness of automotive products.

Keywords: Welding technologies, automotive welding, production efficiency, structural strength.

Постановка проблем. Сучасне автомобілебудування демонструє вражаючу динаміку, що провокує підвищені запити до ключових технологічних етапів, зокрема до показників якості, стабільності, тривалості експлуатації. Застосування класичних способів зварювання нерідко показує низьку ефективність в реаліях сучасного виробництва, особливо при створенні легких та енергоощадних конструкцій, які повинні відповідати жорстким вимогам безпеки, екологічної відповідності та продуктивності. З ускладненням конструкцій та розширенням номенклатури матеріалів, залучених в автомобілебудуванні — таких як високоміцні сталі, алюмінієві та магнієві сплави — виникає потреба впровадження передових зварювальних технологій, що вимагає ретельного техніко-економічного обґрунтування. Паралельно, відсутність цілісного та систематизованого підходу до вибору найоптимальніших зварювальних процесів здатна спричинити зниження якості фінальної продукції, збільшення виробничих витрат та уповільнення темпів модернізації. З огляду на це, надзвичайно важливим є всебічний аналіз актуальних зварювальних технологій з урахуванням специфіки автомобільної галузі, з метою оптимізації виробництва, підвищення конкурентоспроможності підприємств та забезпечення високих стандартів якості.

Мета роботи – аналіз сучасних зварювальних процесів з метою визначення оптимальних методів для забезпечення високої якості надійності та економічності з'єднань в автомобілебудуванні.

Аналіз літературних джерел. Авторами роботи [1] досліджено вплив адгезійного клею на параметри контактного точкового зварювання сталей. Для оцінки процесу використовували аналіз руху електродів та синхронізовані параметри, сформувавши базу даних шляхом збурення вхідних значень (нанесення клею). Металографічні дослідження дозволили точно виміряти діаметр і площу зварної точки, а також виявити дефекти. Побудовані графіки допомогли оцінити вплив клею на технологічні характеристики зварювання.

У роботі [2] досліджено вплив параметрів зварювання, таких як товщина металу, зварювальний струм та кут зварювання, на міцність зварних з'єднань за технологією TIG. Проаналізовано основні види зварювання (TIG, MMA, MIG) та створено регресійну модель для оцінки взаємозв'язку параметрів і якості шва. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації автоматизованих зварювальних процесів і відповідають Цілі сталого розвитку 9 – «Промисловість, інновації та інфраструктура».

У дослідженні [3] проведено екологічний та економічний аналіз чотирьох типів дугового зварювання: TIG (з присадкою і без), MIG, MAG та SMAW. Було зварено 480 зразків із вуглецевої, нержавіючої сталі та алюмінію. Аналіз показав, що TIG-зварювання з присадкою має найбільший

екологічний вплив через високий витрат захисного газу, а SMAW – найменший, зокрема зменшення викидів CO₂ на 93,29%. Також TIG виявився найменш сприятливим для здоров'я людини та найдорожчим через збільшення часу зварювання на 61,36% порівняно з іншими методами.

У дослідженні [4] проаналізовано комбінований процес зварювання TIG–MIG/MAG, що поєднує продуктивність MIG/MAG і кращий контроль тепла від TIG. Вперше проведено експеримент з оцінки впливу полярності MIG/MAG та сили струму TIG на геометрію зварного шва. Порівнювалися зварні шви, отримані традиційним MIG/MAG та комбінованим TIG–MIG/MAG методом. Оцінювали ширину шва, підсилення, глибину проплавлення, площу розплавленої зони та кут опуклості. Аналіз показав, що зміна полярності впливає на форму шва, а введення TIG-струму сприяє кращому проплавленню, збільшенню площі розплавлення, ширині шва та зменшенню підсилення.

У статті [5] розглянуто основні вдосконалення технології TIG-зварювання, спрямовані на покращення глибини проплавлення. Хоча TIG-зварювання широко застосовується для тонколистових матеріалів, інтерес промисловості до зварювання деталей середньої товщини стимулював появу нових варіантів процесу: імпульсне TIG, активоване TIG, TIG із формуванням ключової області, багатоелектродне TIG тощо. У статті проаналізовано механізми цих методів і геометрію зварного шва, отриману за різними технологіями з середини 2000-х років до сьогодні. Метою огляду є демонстрація потенціалу TIG-зварювання для промисловості та науки.

У статті [6] розглянуто способи підвищення ефективності TIG-зварювання шляхом оптимізації процесу, модернізації обладнання та застосування зовнішніх обмежень. Проаналізовано принципи дії цих методів і сучасний стан досліджень. Окрему увагу приділено перспективним рішенням — використанню магнітного вольфрамового електрода та двосоплового TIG-зварювання, що дозволяють покращити керованість процесу, підвищити продуктивність і зменшити габарити зварювального устаткування.

У статті [7] проаналізовано дослідження з лазерно-плазмового зварювання за останні 20 років. Основна увага приділена вивченню дії стисненої плазмової дуги та лазерного випромінювання (1,03–1,07 мкм, переважно волоконного лазера) на сталі й сплави. Розглянуто фізичні основи синергетичного ефекту та можливості його практичного використання. Встановлено, що ефективність такого ефекту зростає завдяки покращенню горіння плазмової дуги та спрощенню формування лазерного кейхолу.

Авторами [8] досліджено метод лазерно-плазмової обробки матеріалів, який поєднує вплив лазерного випромінювання та стисненої плазмової дуги для підвищення ефективності поверхневої обробки металевих деталей. Розглянуто особливості формування гібридного ефекту, що забезпечує глибоке проникнення енергії в матеріал і стабільність процесу. Також проаналізовано роль спеціальних поглинаючих покриттів, які знижують відбиття лазерного світла та сприяють збільшенню глибини обробки. Запропонований підхід дозволяє підвищити якість обробки, продуктивність і розширити можливості застосування цієї технології, зокрема в агроінженерії.

У статті [9] досліджено вплив параметрів багатодрутового дугового зварювання під флюсом на механіко-технологічні властивості зварних швів високоміцних дрібнозернистих сталей. Запропоновано спосіб зменшення теплового впливу та обсягу зварювання за рахунок регулювання конфігурації зварювального дроту і параметрів дуги, що дозволяє зберегти високу стабільність процесу і продуктивність, водночас покращуючи якість зварних з'єднань.

У роботі [10] розглянуто розробку моделі розподілу неметалевих включень за розмірами в металі зварних швів. Проаналізовано експериментальні дані щодо включень у швах, виконаних методами зварювання під флюсом та в захисному газі. Встановлено, що кінцевий розподіл включень відповідає гамма-розподілу з високою ймовірністю. Запропоновано ймовірнісну модель еволюції розподілу включень під час формування шва з параметрами, що залежать від часу.

Викладення основного матеріалу. У сучасному світі автомобільна промисловість є однією з найдинамічніших галузей, що вимагає постійного впровадження інноваційних технологій для підвищення якості, надійності та безпеки транспортних засобів. Одним із ключових аспектів виробництва автомобілів є зварювання — процес, який забезпечує міцність та довговічність конструкцій, з'єднуючи окремі елементи в єдине ціле. Ефективність зварювальних технологій безпосередньо впливає на експлуатаційні характеристики автомобілів, зокрема на їхню вагу, жорсткість кузова, витрати пального та загальну екологічність. Сьогодні існує широкий спектр зварювальних методів, таких як дугове зварювання, точкове контактне зварювання, лазерне зварювання, фрикційне зварювання із перемішуванням тощо, кожен з яких має свої переваги та

обмеження. Вибір конкретної технології зумовлений конструктивними особливостями автомобіля, типом використовуваних матеріалів та вимогами до виробничої ефективності.

Ручне дугове зварювання (ММА) — це універсальна техніка зварювання електричною дугою, що використовує покриті електроди. Найчастіше його використовують для з'єднання товстих металевих деталей, зокрема, під час ремонту або виробництва невеликими партіями. Під час зварювання електрична дуга, сформована між електродом і базовим металом, розплавляє краї деталей і електродний матеріал, в результаті чого утворюється шов. Покриття електрода виконує роль захисту розплавленого металу від окиснення, утворюючи газову та шлакову оболонку. Серед переваг цього методу – простота, мобільність, можливість працювати в різноманітних просторових позиціях та несприятливих умовах. Недоліки включають: відносно низьку продуктивність, потребу у високій кваліфікації зварювальника та обмеженість автоматизації процесу. Незважаючи на ці обмеження, ММА-зварювання залишається важливою технологією, особливо коли інші методи зварювання недоступні або економічно недоцільні.

Напівавтоматичне зварювання в захисному газі (MIG/MAG) – це один з найпопулярніших різновидів дугового зварювання. Суть його полягає в автоматичній подачі плавкого суцільного дроту в зону дуги, котра виникає між дротом і основним металом. В залежності від використаного захисного газу, виділяють MIG (зварювання в інертному газі, як аргон), котре використовується для кольорових металів, і MAG (зварювання в активному газі, наприклад, суміш вуглекислого газу з аргонем), що призначене для чорних металів. Захисний газ має критично важливе значення, він ізолює розплавлений метал від взаємодії з атмосферою, що дозволяє отримати високоякісний шов з мінімальною кількістю домішок та дефектів. Плавкий дріт подається автоматично спеціальним механізмом, а зварювальник контролює процес вручну, поєднуючи автоматизацію та гнучкість ручного управління. Зварювання MIG/MAG вирізняється високою продуктивністю, забезпечує гарне формування шва, дозволяє працювати в різних положеннях у просторі та має широку сферу застосування – від тонколистових деталей кузова до несучих елементів конструкцій. Цей метод є ключовою технологією в масовому автомобілебудуванні завдяки його ефективності, стабільності процесу і можливості інтегрування з робототехнічними системами. В той же час, даний метод вимагає надійного захисту зони зварювання від повітряних потоків, а також точного налаштування параметрів зварювання, щоб уникнути таких дефектів, як пористість або непровар.

Зварювання вольфрамом в інертному газі (TIG) - це надзвичайно точний метод дугового зварювання, що передбачає утворення дуги між неплавким вольфрамовим електродом і основним металом в атмосфері інертного газу, як правило, аргону або гелію. Цей метод дозволяє створювати високоякісні, чисті зварні з'єднання з мінімальною кількістю шлакових включень. TIG- зварювання (Tungsten Inert Gas) демонструє особливу ефективність при роботі з нержавіючими сталями, алюмінієм, титаном, магнієвими сплавами та іншими кольоровими металами, що вимагають ретельного контролю теплового впливу та мінімізації деформації структури. Процес може виконуватися з додаванням присадного матеріалу або без нього, що забезпечує гнучкість у роботі з різноманітними типами швів. Серед ключових переваг даного методу - висока якість та естетичний вигляд шва, відсутність шлаку, точне керування дугою та можливість зварювання тонкостінних деталей. Водночас, TIG-зварювання характеризується відносно низькою швидкістю, висуває високі вимоги до кваліфікації зварювальника та потребує чистого робочого середовища для досягнення стабільних результатів. Враховуючи ці особливості, TIG-зварювання широко використовується в автомобільній промисловості для з'єднання відповідальних вузлів з кольорових металів, а також у виробництві компонентів, де критичними є герметичність і точність шва (наприклад, елементи паливної системи, радіатори, вихлопні системи високого класу та подібне).

Зварювання під флюсом — це надзвичайно ефективний спосіб дугового зварювання, під час якого зварювальна дуга знаходиться під шаром зернистого флюсу, що повністю покриває зону зварювання. Під час роботи автоматично подається плавний електрод, а флюс розплавляється від тепла дуги, формуючи захисний шлаковий шар. Цей шар захищає розплавлений метал від впливу атмосфери та допомагає створити якісний зварний шов. Цей метод найбільше застосовується для зварювання чорних металів, особливо вуглецевих та низьколегованих сталей, товщиною від кількох міліметрів до декількох сантиметрів. Завдяки глибокому проплавленню, високій швидкості наплавлення та можливості механізації, зварювання під флюсом чудово підходить для з'єднання довгих прямих швів у великогабаритних конструкціях, таких як рами, балки, осі, а також окремі несучі компоненти в автомобілебудуванні (наприклад, вантажні платформи чи шасі). Серед переваг цього методу — висока продуктивність, стабільна якість шва, незначні втрати металу через бризки, низьке виділення диму та можливість автоматизувати процес. До недоліків можна віднести

обмежене застосування (лише для горизонтальних і плоских швів), велику вагу обладнання та необхідність видалення шлаку після зварювання. В автомобільній промисловості метод зварювання під флюсом використовується головним чином у важкому сегменті, при виробництві вантажівок, причепів, рамних конструкцій і несучих елементів великої товщини, де надійність та ефективність процесу є критичними факторами.

Електрошлакове зварювання — це високотехнологічний метод з'єднання, призначений для вертикального з'єднання товстостінних деталей з чорних металів, зазвичай товщиною більше 30 мм. Процес базується на використанні тепла, що генерується при проходженні електричного струму через розплавлений шлак, який виступає водночас провідником струму й теплоносієм. На відміну від дугового зварювання, дуга в цьому процесі існує тільки на початковому етапі, а далі тепло утворюється через опір шлаку. Зварювальний дріт або стрічка подаються вертикально в зону зварювання, де плавляться під дією високої температури шлакової ванни. Процес зазвичай виконується в спеціальній мідній водоохолоджувальній формі, яка обмежує розтікання розплаву та формує шов. Основними перевагами електрошлакового зварювання є надзвичайно висока продуктивність, значна глибина проплавлення, мінімальні деформації, висока якість шва та здатність з'єднувати дуже масивні елементи за один прохід. Завдяки цим властивостям метод активно використовується в суднобудуванні, енергетиці, мостобудуванні та важкому машинобудуванні. У сфері автомобілебудування електрошлакове зварювання використовується обмежено — переважно для виготовлення або ремонту великих та товстостінних деталей спеціальної техніки (наприклад, у виробництві великовантажних платформ, кузовів самоскидів чи несучих конструкцій бронетехніки), де потрібне міцне вертикальне з'єднання металевих листів великої товщини.

Плазмове зварювання — це високотехнологічний різновид дугового зварювання, у якому тепло виникає з плазмової дуги, сформованої внаслідок іонізації газу (зазвичай аргону, зрідка в суміші з воднем або гелієм) в спеціальному плазмотроні. Отримана плазма відзначається вкрай високою температурою, що дає змогу ефективно розплавляти навіть тугоплавкі метали та виконувати зварювання з високою точністю. Процес плазмowego зварювання має схожість з TIG-зварюванням, але має ряд переваг: стабільніша дуга, менший діаметр зони термічного впливу, глибший і вузький шов, а також можливість автоматизації процесу. Цей метод забезпечує відмінну якість з'єднань з нержавіючої сталі, алюмінію, титану, міді, магнію та інших кольорових металів і сплавів. Його також можливо застосовувати як у режимі мікрозварювання (для надтонких деталей), так і для глибокого зварювання металів значної товщини. До переваг плазмowego зварювання відносяться надзвичайна точність, чистота шва, можливість зварювання у важкодоступних місцях і мінімальні залишкові напруження. Серед недоліків — складність обладнання, високі вимоги до точності налаштувань, обмеження щодо просторових положень та вартість обладнання. У автомобільній промисловості плазмове зварювання знаходить застосування здебільшого в спеціалізованих виробничих процесах, які потребують високої точності, як-от: зварювання тонкостінних нержавіючих або алюмінієвих компонентів, герметичних систем, елементів електромобілів, а також при виробництві деталей зі складною геометрією, де інші методи є надто грубими або неточними.

Лазерне зварювання — це надзвичайно точний спосіб з'єднання металів, що використовує як джерело теплової енергії сконцентрований лазерний промінь великої потужності. Завдяки невеликій зоні нагріву, високій щільності енергії випромінювання та ретельному контролю параметрів, даний метод дає змогу отримувати з'єднання з мінімальними деформаціями та високою відтворюваністю. Лазерне зварювання широко застосовується для з'єднання тонких металевих листів, таких як нержавіюча сталь, алюміній, титан і високолеговані сталі, особливо ефективно при виробництві деталей, що потребують високої точності, міцності та герметичності. Головними перевагами цього методу є висока швидкість процесу, мінімальний вплив тепла, що зменшує ризик деформацій, та також висока якість шва з малою кількістю пустот та тріщин. Крім того, лазерне зварювання дозволяє з'єднувати деталі складної форми та легко інтегрується в автоматизовані та роботизовані виробничі процеси. Водночас метод має і недоліки — значну вартість устаткування, потребу в точному позиціонуванні деталей, необхідність ретельної підготовки поверхні та труднощі в роботі з товстими металами без спеціальної попередньої обробки. В сучасній автомобільній промисловості лазерне зварювання активно використовується для виготовлення кузовних деталей, зварювання акумуляторних блоків для електромобілів, компонентів шасі та паливних систем, де надзвичайно важливими є як механічна міцність, так і зовнішній вигляд зварного шва.

Для автопрому найбільш підходящим методом є напіваавтоматичне зварювання у захисному газі (MIG/MAG). Ця техніка гарантує високу швидкість роботи та бездоганну якість з'єднань, що є критичним для виготовлення великої кількості автозапчастин. MIG/MAG добре працює з широким спектром металів, включаючи як сталь, так і кольорові метали, що робить його універсальним для різних деталей та конструкцій. До того ж, цей метод легко автоматизується та поєднується з роботами, що збільшує продуктивність та зменшує витрати. Хоча інші методи, такі як TIG або лазерне зварювання, можуть мати кращі характеристики з точки зору точності та якості шва, вони складніші у використанні, дорожчі та повільніші, тому зазвичай використовуються для спеціальних або особливо відповідальних деталей. Таким чином, MIG/MAG є оптимальним та найпоширенішим методом зварювання у серійному автомобілебудуванні.

Висновки. Сучасне автомобілебудування нині немислиме без використання ефективних зварювальних технологій, що гарантують високу міцність, надійність та безпеку автотранспортних засобів. Розмаїття методів зварювання – від класичного ручного дугового до високотехнологічного лазерного чи фрикційного – дозволяє оптимально адаптуватись до різних матеріалів, конструктивних особливостей та обсягів виробництва. Автоматизація та роботизація зварювальних процесів значно підвищують продуктивність, стабільність якості та повторюваність результатів, що є вкрай важливим для великосерійного випуску автомобілів. З розвитком новітніх матеріалів, зростанням попиту на електротранспорт та посиленням екологічних вимог значення інноваційних зварювальних технологій тільки зростатиме. Для майбутніх досліджень надзвичайно важливо сфокусуватись на оптимізації процесів для роботи з новими легкими і композитними матеріалами, покращенні систем контролю якості та забезпеченні екологічної безпеки виробництва. Це дасть змогу не тільки поліпшити якість та надійність автомобілів, а й укріпити конкурентоспроможність та технологічний рівень автомобільної промисловості в цілому.

Список використаних джерел:

1. Советченко Я. В. Оптимізація технології контактного точкового зварювання в умовах дії промислових факторів : магістерська дис. : 131 Прикладна механіка / Ярослав Вадимович Советченко. – Київ, 2021. – 104 с.
2. Максимов Д. М. Розробка автоматизованого технологічного процесу зварювання металевих виробів : пояснювальна записка до атестаційної роботи здобувача вищої освіти на другому (магістерському) рівні, спеціальність 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка / Д. М. Максимов ; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. – Харків, 2025. – 94 с.
3. González-González C., Los Santos-Ortega J. Environmental and Economic Analyses of TIG, MIG, MAG and SMAW Welding Processes / Department of Mechanical Engineering, Mechanical Area of Continuous Media and Theory of Structures, University of La Rioja, Logroño, Spain, 2023.
4. Costa G. C. da Silva, Resende A. A. de. Evaluation of the TIG–MIG/MAG welding process in direct polarity // Springer Nature Link. 2020. Vol. 2. P. 164.
5. Kumar K., Kumar Ch S. A review on TIG welding technology variants and its effect on weld geometry // Materials Today. 2022. Vol. 50, Part 5. P. 999–1004.
6. Zhao H., Zhang S., Chen H., Li Y. Methods to Improve TIG Welding Efficiency // Transactions of the Indian Institute of Metals. 2024. Vol. 77. P. 2231–2245.
7. Коржик В. М., Хаскін В. Ю., Ілляшенко Є. В. та ін. Гібридне лазерно-плазмове зварювання: ефективність і нові можливості // Гібридні процеси зварювання. Автомат. зварювання. 2023. № 12.
8. Ковальчук Ю. О. Метод лазерно-плазмової обробки матеріалів // Solving Scientific Problems Using Innovative Concepts. 2024. С. 192–195.
9. Gook S., El-Sari B., Biegler M., Rethmeier M., Lichtenthäler F., Stark M. Багатодругове дугове зварювання високоміцних дрібнозернистих сталей під флюсом // Металургія і технологія дугового зварювання та наплавлення. 2022. № 1. С. 9–13.
10. Тараборкін Л. А., Головка В. В. Розрахунково-експериментальна модель розподілу неметалевих включень за розмірами в металі зварних швів // Автоматичне зварювання. 2021. С. 27–32.

Р.М. Харак, О.С. Гіззатуллін

Полтавський державний аграрний університет

ОБГРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙНОЇ СХЕМИ ЕЛЕКТРОННОГО ТАХОМЕТРА ДЛЯ ДИЗЕЛЯ

Об'єктом дослідження є системи контролю за роботою дизеля, частота обертання колінчатого валу, електронний тахометр. Проблемою, що вирішувалася, було визначення техніко-технологічних рішень, які уможливають підвищення ефективності роботи дизеля шляхом обґрунтування конструкційної схеми електронного тахометра. За результатами досліджень обґрунтовано конструкцію та принцип роботи експериментального електронного тахометра для дизеля на базі ARDUINO R3 UNO, датчика Холла SS49E та дисплейного модуля 1602 РК. Запропоновано розглядати електронний тахометр як доповнення до експериментальної електронної системи регулювання паливободачі для дизеля на базі паливного насоса НД-21 розподільного типу.

Встановлено лінійну залежність між показниками розробленого електронного тахометра та механічного тахометра моделі ТЧ10-Р (ДСТУ EN60051-2:2017) за середнього квадратичного відхилення $\pm 4,8 \text{ хв}^{-1}$. Відзначено, що розбіжність показників аналогового і цифрового тахометрів не перевищувала 2,5% у всьому діапазоні вимірювань (до 1000 хв^{-1}). Електронний тахометр мав швидкий час відгуку ($\sim 150 \text{ мс}$), що уможливило відстежувати навіть короткочасні змінення частоти обертання.

Ключові слова: система контролю, дизель, частота обертання колінчатого валу, електронний тахометр.

R.M. Kharak, O.S. Hizzatullin

JUSTIFICATION OF THE DESIGN SCHEME OF AN ELECTRONIC TACHOMETER FOR A DIESEL ENGINE

The object of the study is diesel engine monitoring systems, crankshaft rotational speed, and an electronic tachometer. The problem addressed was to determine technical and technological solutions that improve the efficiency of diesel operation by justifying the design scheme of an electronic tachometer. Based on the research results, the design and operating principle of an experimental electronic tachometer for a diesel engine were substantiated. The tachometer was developed on the basis of the Arduino Uno R3 microcontroller, Hall effect sensor SS49E, and 1602 LCD module. The device is proposed as a complementary component of an experimental electronic fuel supply control system for a diesel engine equipped with a distributor-type fuel injection pump ND-21.

A linear relationship was established between the readings of the developed electronic tachometer and the mechanical tachometer model TCh10-R (DSTU EN60051-2:2017), with a root mean square deviation of $\pm 4.8 \text{ rpm}$. The discrepancy between the analog and digital tachometer readings did not exceed 2.5% over the entire measurement range (up to 1000 rpm). The electronic tachometer demonstrated a fast response time ($\sim 150 \text{ ms}$), which made it possible to track even short-term changes in rotational speed.

Keywords: control system, diesel engine, crankshaft speed, electronic tachometer.

Вступ. У сучасних умовах енергозбереження та підвищення ефективності сільськогосподарських машин особливе значення має удосконалення систем контролю за роботою дизелів. Частота обертання колінчатого валу є одним з основних параметрів, який відображає режим роботи дизеля і безпосередньо впливає на подачу пального, ефективність згоряння, зношення вузлів і рівень шкідливих викидів. Відповідно, точне та оперативне вимірювання цього параметра є критично важливим для побудови сучасних систем автоматизованого керування.

Наведене обумовлює актуальність розроблення дешевих, надійних та високоточних електронних тахометрів, які здатні працювати в умовах високих вібрацій, температур та забруднень, характерних для сільськогосподарської техніки.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Серед існуючих систем вимірювання частоти обертання дизеля найбільш поширеними є механічні тахометри та промислові електронні сенсори індуктивного або оптичного типу. Механічні тахометри, такі як модель ТЧ10-Р відповідно до ДСТУ EN60051-2:2017, забезпечують прийнятну точність, проте характеризуються низкою суттєвих недоліків: інерційність, залежність точності від ручного встановлення, зношення механічних частин, чутливість до вібрацій та незручність в інтеграції з електронними системами керування [1].

Індуктивні сенсори часто потребують спеціального виконання колінчатого валу або наявності зубчастого колеса, що ускладнює модернізацію старих моделей дизелів [2]. Крім того, для зазначених сенсорів характерно зменшення точності за умов забруднення або змінненню проміжків. Оптичні тахометри демонструють високу точність, проте є малопридатними для роботи в умовах пилу, вологи та забруднення робочих поверхонь, а також вимагають точного позиціонування та чистоти оптичного каналу [3].

Системи на базі магніторезистивних або ефекту Холла сенсорів мають більшу стійкість до зовнішніх впливів та забезпечують можливість побудови дешевих, компактних і надійних систем. Проте у більшості випадків їх використовують в автомобілях або побутових електроприладах, а не в умовах експлуатації сільськогосподарської техніки.

Потенціал мікропроцесорних рішень на базі Arduino для побудови систем моніторингу параметрів агрегатів відзначено у дослідженнях [4-5]. Проте необхідного обсягу прикладних досліджень з практичним використанням подібних систем у поєднанні з дизелями, що мають паливні насоси розподільного типу, зокрема моделі НД-21, на сьогодні ще не достатньо [6-7].

За таких умов існує нагальна потреба в розробленні та експериментальній перевірці електронного тахометра, у якого поєднано переваги сенсорів Холла, мікроконтролера оброблення та зручного інтерфейсу відображення. Така система повинна бути сумісною з дизелями сільськогосподарської техніки, легко адаптуватися до різних моделей, працювати в умовах забруднення і вібрацій та забезпечувати точне й стабільне вимірювання частоти обертання.

Мета та задачі досліджень. Метою досліджень є підвищення ефективності роботи дизеля шляхом обґрунтування конструкційної схеми електронного тахометра.

Для досягнення мети було поставлено наступні завдання:

- розробити електронний тахометр для дизеля на базі ARDUINO R3 UNO, датчика Холла SS49E та дисплейного модуля 1602 РК;
- провести дослідження з визначення точності вимірювань розробленого електронного тахометра у порівнянні з механічним тахометром моделі ТЧ10-Р (ДСТУ EN60051-2:2017);
- дослідити розроблений тахометр у складі електронної системи регулювання паливоподачі (на базі паливного насоса НД-21).

Методика проведення досліджень. Експериментальні дослідження проводили у лабораторних умовах на базі токарного верстата 1М61, який забезпечував обертання об'єкта з точно заданою частотою. Це дозволило створити стабільне середовище для порівняльного аналізу показників.

Неодимовий магніт закріплювали на патроні токарного верстата. Датчик Холла SS49E встановлювали на відстані 5–10 мм від траєкторії руху магніту. Зчитування імпульсів здійснювали за допомогою мікроконтролера Arduino Uno R3. Частоту обертання (RPM-Revolutions Per Minute, хв^{-1}), обчислювали і відображали на дисплей РК-1602. Для перевірки точності вимірювань розробленого електронного тахометра використовували механічний тахометр моделі ТЧ10-Р (ДСТУ EN60051-2:2017). Зазначений тахометр забезпечує вимірювання частоти обертання у діапазоні до 1000 хв^{-1} з класом точності 1,0.

Механічний тахометр фіксували вручну безпосередньо до торця вала. Для кожного режиму роботи (змінювали частоту обертання) знімали показники з обох тахометрів (аналогового та цифрового). Дані зчитувалися після стабілізації обертів, фіксувалися вручну і фотографувалися для верифікації. Повторюваність дослідів п'ятикратна.

Похибки розраховували за формулою:

$$\Delta = \frac{RPM_{\text{ел.}} - RPM_{\text{мех.}}}{RPM_{\text{мех.}} \cdot 100\%}$$

Основне оброблення результатів експериментальних даних виконували згідно [8] з використанням програмного середовища Microsoft Excel. Визначали наступні величини: середнє значення, стандартна похибка, дисперсія, медіана, середнє квадратичне відхилення, коефіцієнти ексцесу та асиметрії.

Методика досліджень розробленого тахометра у складі електронної системи регулювання паливоподачі (на базі паливного насоса НД-21). Дослідження функціонування електронного тахометра у складі експериментальної системи регулювання паливоподачі проводили на лабораторному стенді КІ-15711, оснащеному паливним насосом розподільного типу НД-21. Метою дослідження було перевірити можливість інтеграції тахометра до системи зворотного зв'язку для керування подачею пального шляхом вимірювання обертів привідного вала паливного насоса.

Привід паливного насоса здійснювали за допомогою гідравлічного двигуна з регульованою частотою обертання. Неодимовий магніт закріплювали на вихідному валу насоса, а датчик Холла SS49E встановлювали навпроти магніта на відстані 5–10 мм. Сигнал з датчика надходив на мікроконтролер Arduino Uno R3, який обчислював частоту обертання і виводив значення на дисплей 1602 РК.

На основі зчитаних значень RPM система формувала керуючий сигнал для сервоприводу, що змінював положення важеля подачі пального. Було змодельовано різні режими роботи шляхом варіації частоти обертання вихідного вала стенда і відповідно – частоти обертання вала насоса.

У дослідженнях оцінювали:

- стабільність регулювання подачі пального при змінненні обертів;
- точність відстежування частоти обертання тахометром;
- час реакції системи на змінення обертів (затримка між зміною сигналу та переміщенням важеля);
- зручність візуального контролю за допомогою дисплея.

Порівняння проводили між режимами з автоматичним регулюванням (із зворотним зв'язком від тахометра) та без нього (ручна фіксація положення важеля). Дані фіксували у табличній формі, а результат обробляли з використанням лінійної регресії та графічного аналізу для оцінення ефективності роботи системи.

Дані накопичували протягом 10 циклів для кожного режиму з подальшим усередненням результатів. Також проводили фото- і відеофіксацію параметрів з дисплея тахометра і сервоприводу.

Результати досліджень. За результатами досліджень обґрунтовано конструкцію та принцип роботи експериментального електронного тахометра для дизеля на базі ARDUINO R3 UNO, датчика Холла SS49E та дисплейного модуля 1602 РК. Електронний тахометр розглядається як доповнення до експериментальної електронної системи регулювання паливоподачі для дизеля на базі паливного насоса НД-21 розподільного типу високого тиску.

Структурно-функціональну схему тахометра наведено на рис. 1.



Рис.1. Структурно-функціональна схема тахометра

В ході реалізації поставленої мети було розроблено систему, яка включає наступні елементи.

Мікроконтролер Arduino Uno R3 виконує функції обробки сигналів від датчиків і формування керуючого сигналу для сервоприводу. Основне призначення мікроконтролера – накопичення та збирання сигналів, обробка даних та виведення результатів на дисплей. До переваг застосування мікроконтролера відносять простоту програмування, відкрите середовище розробки, велика кількість доступних бібліотек і документації. Використання Мікроконтролера уможливорює оперативне налаштування під різні типи двигунів, модернізацію ПЗ без втручання в апаратну частину, високу точність розрахунку RPM за малої затримки.

Модуль датчика Холла SS49E виконує функцію зчитування магнітного поля. Він призначений для фіксації змінного магнітного поля від магніта та перетворення його в аналоговий сигнал напруги, пропорційний частоті обертання. Переваги застосування: висока чутливість (від $\pm 1,0$ до $\pm 6,0$ мТл), лінійна передача сигналу, робочий діапазон температур – від -40 до $+125^{\circ}\text{C}$. Застосування датчика Холла SS49E уможливорює точне та стабільне зчитування обертів навіть за умов забруднення чи вібрацій, сумісність із мікроконтролером без потреби в додаткових підсилювачах.

Дисплейний модуль 1602 РК забезпечує зручне виведення інформації відносно частоти обертання двигуна. Модуль 1602 РК призначено для виведення оброблених даних у вигляді RPM (обертів за хвилину) з метою візуального контролю оператором. До переваг модуля віднесено: просте підключення через шину I2C або паралельний інтерфейс, чітке зображення навіть за яскравого освітлення; можливість відображення допоміжної інформації (наприклад, температури чи помилок). Модуль 1602 РК підвищує зручність контролю роботи двигуна, зменшує час на технічну діагностику.

Неодимовий магніт закріплено на колінчатому валі і під час обертання створює змінне магнітне поле, яке фіксує датчик Холла. До переваг від застосування неодимового магніту віднесено надзвичайно потужне магнітне поле за умов компактних розмірів, стабільну індукцію сигналу навіть за високих обертах, надійне кріплення та тривалий термін служби. Неодимовий магніт забезпечує стабільну роботу датчика Холла, характеризується мінімальною інерцією, що не впливає на динаміку валу.

Бортова мережа МТА забезпечує енергоживлення всіх елементів системи тахометра, завдяки чому її елементи надійно захищаються від перенапруги та короткого замикання.

Опис роботи електронного тахометра. Електронний тахометр призначено для безперервного вимірювання частоти обертання колінчатого валу дизеля та виведення значення на індикатор у реальному часі. Робота системи базується на взаємодії чутливого елемента – датчика Холла SS49E, керуючого контролера Arduino Uno R3 та дисплейного модуля 1602 ЖК.

Принцип роботи системи тахометра полягає у наступному. Магнітний сигнал створюється неодимовим магнітом, що кріпиться на колінчатому валу дизеля. Під час обертання валу магніт проходить повз встановлений датчик Холла SS49E, створюючи змінне магнітне поле. Датчик Холла генерує аналоговий електричний сигнал, амплітуда якого змінюється залежно від сили магнітного поля. З кожним проходженням магніта формується пік сигналу, що відповідає одному оберту валу (або заданій кількості обертів залежно від конфігурації). Сигнал від датчика надходить на вхід Arduino Uno R3, де реалізований програмний код обробляє імпульси, обчислюючи кількість імпульсів за хвилину. На основі цих даних система визначає частоту обертання двигуна (RPM). Встановлені значення RPM відображає на дисплеї 1602 ЖК. Завдяки інтерактивності системи, оператор має змогу у реальному часі спостерігати за динамікою обертів двигуна.

Відзначимо наступні очікувані позитивні ефекти від використання тахометра:

- підвищення точності регулювання паливоподачі. Тахометр надає точне значення частоти обертання, що дозволяє електронній системі керування паливом працювати в оптимальних режимах. Зазначене сприяє ефективному спалюванню пального, уникненню перевитрат і підвищенню енергоефективності;

- зменшення витрат пального. За рахунок точного контролю обертів, можливо уникнути роботу двигуна в надлишкових або неекономічних режимах. В польових умовах очікується зменшення витрати дизеля на 5–10 % (у процесі експериментальних досліджень конкретне значення буде уточнено);

- підвищення надійності двигуна. Постійний контроль за обертами уможливило встановити відхилення або перевантаження двигуна на ранніх стадіях. Зменшення зношення механічних частин за рахунок роботи у допустимому діапазоні частот обертання;

- спрощення технічного обслуговування. Завдяки доступному візуальному інтерфейсу з дисплеєм, оператори можуть швидко діагностувати роботу двигуна без необхідності спеціалізованих приладів. Зазначене скорочує час на обслуговування та ремонти;

- універсальність і масштабованість. Систему можливо адаптувати до різних типів двигунів та інтегрувати з іншими електронними блоками (наприклад, дистанційним моніторингом або автоматичним регулюванням). За потреби тахометр може бути частиною єдиної системи контролю сільськогосподарської техніки.

За результатами досліджень виконано 60 вимірювань на різних частотах обертання – від 100 до 1000 хв^{-1} з інтервалом 100 хв^{-1} .

Середнє значення похибки становило 1,37 %, що свідчить про високу точність приладу. Найбільші похибки зафіксовано за низьких обертів ($100\text{--}200 \text{ хв}^{-1}$), які не перевищувала 2,2 %. За умов збільшення частоти обертання похибка зменшувалась до менше 1 %. Параметри регресійного аналізу складали: середньоквадратичне відхилення $\pm 4,8 \text{ хв}^{-1}$; коефіцієнт детермінації $R^2 = 0.996$, що свідчить про майже повну лінійну залежність між механічними та електронними вимірюваннями; t – критерій Стюдента для вибірки з 60 вимірювань на рівні значущості $\alpha = 0,05$ показав відсутність статистично значущих відмінностей між показниками електронного і механічного тахометрів.

Це підтверджує ефективність електронного тахометра як вимірювального інструмента для систем енергозбереження та контролю режимів роботи дизеля.

Встановлено лінійну залежність між показниками розробленого електронного тахометра та механічного тахометра моделі ТЧ10-Р (ДСТУ EN60051-2:2017) за середнього квадратичного відхилення $\pm 4,8 \text{ хв}^{-1}$:

$\text{RPM(електронний)} = 1,018 \text{ RPM(механічний)} - 6,5$.

Відзначено, що розбіжність показників аналогового і цифрового тахометрів не перевищувала 2,5% у всьому діапазоні вимірювань (до 1000 хв⁻¹). Електронний тахометр мав швидкий час відгуку (~150 мс), що уможливило відстежувати навіть короточасні зміни частоти обертання.

Результати дослідження (фотофіксація показників) підтвердили узгодженість даних між механічною та електронною системами (рис. 2). Результати вимірювань частоти обертання механічним тахометром складали близько 170 хв⁻¹; електронним 171 хв⁻¹. Різниця становила менше 1 хв⁻¹ (близько 0,6%).

Під час подальших випробувань у складі електронної системи регулювання паливоподачі (на базі паливного насоса НД-21 високого тиску) встановлено такі ефекти:

зменшення витрати пального (прогнозовано до 7,6 %), що досягається за рахунок стабілізації обертів та уникнення неекономічних режимів;

зменшення механічного зносу завдяки підтриманню оптимальних частот обертання колінчастого валу;

скорочення викидів СО та NO_x внаслідок більш рівномірного згоряння пального;

підвищення надійності і передумови для створення адаптивної системи керування паливоподачею з зворотним зв'язком.

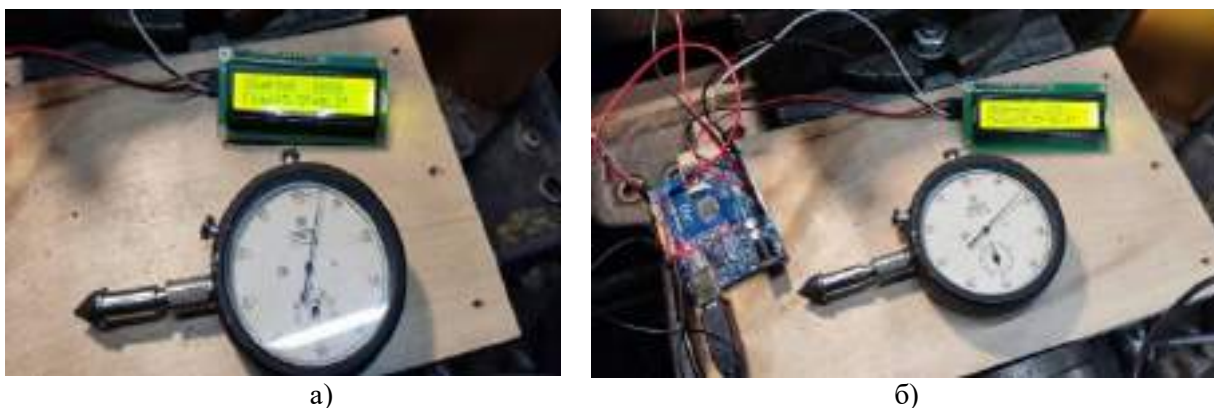


Рис.2. Показники результатів досліджень з визначення кількості обертів обертання механічного (а) та розробленого електронного тахометрів (б).

Результати досліджень розробленого тахометра у складі електронної системи регулювання паливоподачі (на базі паливного насоса НД-21). За результатами експериментальних досліджень, проведених на лабораторному стенді КІ-15711 з використанням експериментального електронного тахометра, відзначено:

- зменшення витрат пального на 7,6 % внаслідок оптимізації регулювання паливоподачі;
- зменшення перевантажень та механічного зношування двигуна, що створює позитивні очікування щодо підвищення його надійності;
- скорочення викидів шкідливих речовин (СО, NO_x) унаслідок стабілізації частоти обертання;
- забезпечення передумов для побудови адаптивної системи керування паливоподачею з використанням зворотного зв'язку.

За результатами досліджень розроблено систему, яка володіє значними перспективами за умов впровадження у сільськогосподарську техніку з метою підвищення її енергоефективності.

Висновки. За результатами досліджень обґрунтовано конструкцію та принцип роботи експериментального електронного тахометра для дизеля на базі ARDUINO R3 UNO, датчика Холла SS49E та дисплейного модуля 1602 РК. Запропоновано розглядати електронний тахометр як доповнення до експериментальної електронної системи регулювання паливоподачі для дизеля на базі паливного насоса НД-21 розподільного типу високого тиску.

Встановлено лінійну залежність між показниками розробленого електронного тахометра та механічного тахометра моделі ТЧ10-Р (ДСТУ EN60051-2:2017) за середнього квадратичного відхилення $\pm 4,8$ хв⁻¹.

Відзначено, що розбіжність показників аналогового і цифрового тахометрів не перевищувала 2,5% у всьому діапазоні вимірювань (до 1000 хв⁻¹). Електронний тахометр мав швидкий час відгуку (~150 мс), що уможливило відстежувати навіть короточасні змінення частоти обертання.

Список використаних джерел:

1. Дорошенко С.І. Мікропроцесорна техніка в автоматизації. – К.: Либідь, 2020. – 320 с.
2. Попов А.С. Мікроконтролери і програмування в середовищі Arduino. – Харків: Ранок, 2021. – 256 с.
3. Григор'єв В.І., Шпак М.І. Системи автоматизованого керування агропромисловими об'єктами. – Вінниця: Нова Книга, 2022. – 284 с.
4. Arduino. Arduino Uno R3 Datasheet..cc. <https://docs.arduino.cc>.
5. Allegro Microsystems. SS49E Linear Hall Effect Sensor Datasheet. <https://www.allegromicro.com>.
6. Wu, L., Li, J., & Chen, Z. *Embedded monitoring system for diesel engines based on Hall effect sensing and Arduino MEGA// Sensors*. – 2022. – Vol.22, №4, – P.1235. – DOI: <https://doi.org/10.3390/s22041235>.
7. Mohan, S., Vigneswaran, T. *Smart tachometer system using microcontroller and Hall sensors for engine monitoring// Journal of Sensors and Actuator Networks*. – 2021. – Vol.10(2). –P. 38. – DOI: <https://doi.org/10.3390/jsan10020038>.
8. Хайліс Г.А., Коновалюк Д.М. Основи проектування і дослідження сільськогосподарських машин. – Київ: НМК ВО, 1992. – 320с.

О.І. Мохонько, А.І. Іванісік

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

ОПТИМІЗАЦІЯ МОДЕЛЮВАННЯ ВИМУШЕНОГО РАМАНІВСЬКОГО РОЗСПОВАННЯ В САМОФОКУСУЮЧИХ РІДИНАХ

У статті розглядається чисельна верифікація фізичної коректності використання квадратичної залежності радіуса лазерного пучка при моделюванні вимушеного раманівського розсіювання (ВРР) у самофокусуємих середовищах, таких як толуол. Проаналізовано вплив різних степенів залежності коефіцієнта підсилення від радіуса пучка ($n = 1, n = 2, n = 3$) на стабільність і точність результатів. Розроблено два чисельні підходи: метод Адамса із адаптивним кроком і ітераційний метод Ейлера з фіксованим кроком, які базуються на законах збереження енергії та ефекті Керра. Моделювання проведено з параметрами, характерними для толуолу (початковий радіус пучка 113 мкм, коефіцієнт заломлення середовища 1.49, довжина вхідної хвилі лазерного випромінювання 694.3 нм, критична потужність 25 кВт). Результати демонструють, що квадратична модель ($n = 2$) забезпечує оптимальну комбінацію стабільності та фізичної коректності, точно відображаючи поріг генерації стоксової компоненти ($z_f \approx 0.083$ м) і стабілізацію потужностей. Лінійна модель ($n = 1$) недооцінює ефект самофокусування, порушуючи закон збереження енергії, тоді як кубічна модель ($n = 3$) виявляє нестабільність. Робота має практичне значення для оптимізації лазерних систем у спектроскопії, оптоелектроніці та біомедицині. Крім того, важливим аспектом створення чисельних програм стало підвищення ефективності обчислень. Реалізація моделювання у вигляді окремих програм дозволяє суттєво скоротити час розрахунків порівняно з ручним аналізом або використанням універсальних пакетів. Це дає змогу досліджувати складні нелінійні ефекти у реалістичних умовах з високою роздільною здатністю.

Ключові слова: вимушене раманівське розсіювання, стоксові компоненти, самофокусування, самофокусуємі середовища.

O. Mokhonko, A. Ivanisik

OPTIMIZATION OF STIMULATED RAMAN SCATTERING MODELING IN SELF-FOCUSING LIQUIDS

This study presents a numerical verification of the physical validity of using a quadratic dependence of the laser beam radius in modeling stimulated Raman scattering (SRS) in self-focusing media, such as toluene. The influence of various power-law dependencies of the gain coefficient on the beam radius ($n = 1, n = 2, n = 3$) is analyzed in terms of numerical stability and result accuracy. Two numerical approaches are developed: the Adams method with adaptive step size and the Euler iterative method with fixed step size, both based on energy conservation laws and the Kerr effect. The simulations are performed using parameters typical for toluene (initial beam radius of 113 μm , refractive index of 1.49, laser wavelength of 694.3 nm, and critical power of 25 kW). The results show that the quadratic model ($n = 2$) provides the optimal combination of stability and physical correctness, accurately capturing the Stokes generation threshold ($z_f \approx 0.083$ m) and power stabilization. The linear model ($n = 1$) underestimates the self-focusing effect, violating energy conservation, while the cubic model ($n = 3$) exhibits numerical instability. This work has practical significance for optimizing laser systems in spectroscopy, optoelectronics, and biomedicine. Moreover, an important aspect of developing numerical programs was to improve computational efficiency. Implementing the modeling in the form of standalone programs allows for a significant reduction in calculation time compared to manual analysis or the use of general-purpose software packages. This enables the investigation of complex nonlinear effects under realistic conditions with high spatial resolution.

Keywords: stimulated Raman scattering, Stokes component, self-focusing, self-focusing media.

Постановка проблеми. Вимушене раманівське розсіювання (ВРР) є фундаментальним нелінійним оптичним процесом, що відіграє ключову роль у лазерній спектроскопії, оптоелектроніці, біомедичних дослідженнях та генерації нових довжин хвиль [1, 2, 3]. Цей феномен виникає внаслідок взаємодії інтенсивного лазерного пучка з молекулами середовища, що призводить до переносу енергії від пучка накачування до стоксової компоненти через нелінійні ефекти [4, 5]. Точність чисельного моделювання ВРР є вирішальною для прогнозування ефективності генерації стоксового випромінювання, що має пряме застосування в розробці лазерних систем для медичної діагностики, оптичного зв'язку та галузі фотонних технологій [6, 7]. Одним із критичних параметрів у цих моделях є залежність коефіцієнта підсилення від геометричних характеристик пучка, зокрема від його радіуса ($a(z)$), який зазнає змін через самофокусування — ефект, спричинений модуляцією показника заломлення під впливом інтенсивності світла [8, 9].

Зазвичай у моделях ВРР використовується квадратична залежність коефіцієнта підсилення, виражена як $(1/a(z)^2)$, що базується на припущенні про пропорційність інтенсивності пучка до квадрата інтенсивності електричного поля та обернено пропорційну залежність від площі перерізу [4, 10]. Однак фізична коректність цієї залежності в умовах самофокусування залишається предметом дискусій. Дослідження Berge [5] та Etchegoin [10] вказують на можливі похибки при

© О.І. Мохонько, А.І. Іванісік

моделюванні сильних нелінійностей, тоді як у роботі Ivanisik [4] підкреслено необхідність верифікації в реальних експериментальних умовах. Недостатня увага до цього аспекту може призводити до значних розбіжностей між симуляціями та експериментальними даними, особливо в середовищах із високою нелінійною сприйнятливістю, таких як толуол чи бензол.

Окрему увагу варто звернути на аспект оптимізації чисельних методів: ефективна реалізація алгоритмів дозволяє значно прискорити процес моделювання, що є критичним при аналізі великих обсягів параметрів або при потребі оперативного прийняття рішень у прикладних задачах. Саме це стало однією з причин створення власних чисельних програм для верифікації.

Описані вище аспекти ускладнюють оптимізацію лазерних систем і підкреслюють потребу в детальному аналізі різних степенів залежності які використовуються роботах, зокрема при показниках степеня $n = 1$, $n = 2$, та $n = 3$ з використанням незалежних чисельних методів для забезпечення достовірності результатів [6, 9].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Класичні роботи, такі як Raman і Krishnan [1] та Shen [3], заклали теоретичні основи BPP, однак не розглядали чисельного аналізу залежності від радіуса пучка. Монографія Boyd [2] детально описала нелінійні оптичні ефекти, але зосередилася на аналітичних підходах.

Сучасні дослідження демонструють різноманітність моделей. Lallemand [11] та Weiner [12] пропонують лінійну залежність $g_{S1}(z) = \frac{g_0 a_0}{a(z)}$, що спрощує обчислення, але недооцінює ефекти самофокусування, що підтверджено експериментами Hafizi [13] та Ivanisik [4] які обґрунтовують квадратичну модель $g_{S1}(z) = \frac{g_0 a_0}{a(z)^2}$, аргументуючи її відповідністю розподілу інтенсивності гауссового пучка. Berge [5] та Etchegoin [10] досліджували вищі степені, такі як $g_{S1}(z) = \frac{g_0 a_0}{a(z)^3}$, для моделювання колапсу пучка, але зазначають чисельну нестабільність. У працях, що стосуються біомедицини Freudiger [14] надає перевагу лінійній моделі через простоту, тоді як Zhang [15] пропонує гібридний підхід ($n = 1.5$) для багатокомпонентних систем. Незважаючи на ці зусилля, брак уніфікованого підходу та верифікації в умовах самофокусування вказує на необхідність подальших досліджень [2, 3].

Постановка завдань. Метою даної роботи є: провести детальне порівняння чисельної стабільності та фізичної коректності моделей BPP при різних степенях залежності коефіцієнта підсилення від степеня радіуса пучка ($(n = 1)$, $(n = 2)$, $(n = 3)$). Теоретично та чисельно обґрунтувати переваги використання квадратичної залежності ($(n = 2)$) у моделюванні BPP у самофокусуємих середовищах.

Розробити та застосувати два незалежні чисельні підходи для верифікації результатів, щоб усунути артефакти та підвищити достовірність моделі. Надати рекомендації щодо використання оптимальної моделі для подальших досліджень і практичних застосувань у різних самофокусуємих середовищах.

Викладення основного матеріалу. BPP у самофокусуємому середовищі описується системою нелінійних диференціальних рівнянь для амплітуд електричних полів лазера E_L та стоксової компоненти E_{S1} [8]:

$$\frac{dE_L}{dz} = -g_L E_L E_{S1}^2 \quad (1)$$

$$\frac{dE_{S1}}{dz} = g_{S1} E_{S1} E_L^2 \quad (2)$$

де g_L – коефіцієнт підсилення лазерного випромінювання, g_{S1} коефіцієнт підсилення стоксової компоненти, які розраховуються за (3) та (4) відповідно:

$$g_L = \left(\frac{\lambda_{S1}}{\lambda_L}\right) g_{S1} \quad (3)$$

$$g_{S1} = g_0 \left(\frac{a_0}{a(z)}\right)^n \quad (4)$$

де λ_L – довжина хвилі лазера, λ_{S1} – довжина хвилі стоксової компоненти, a_0 – початковий радіус пучка, g_0 – коефіцієнт підсилення, n – ступінь залежності радіуса пучка.

Внаслідок явища самофокусування відбувається зміна радіуса пучка. Розрахунок змін проводиться відповідно до [4]:

$$a(z) = a_0 \sqrt{1 - \frac{z^2}{z_f^2} \mu/2 + \frac{a_f^2}{a_0^2}} \quad (5)$$

$$z_f = \frac{0.3806ka_0^2}{\sqrt{\bar{P}-0.7703^2-0.0528}} \quad (6)$$

$$k = \frac{2\pi n}{\lambda_L} \quad (7)$$

де $a(z)$ – радіус лазерного пучка в точці на відстані z від початку середовища, z_f характерна відстань самофокусування, a_f – мінімальний радіус пучка в точці фокусу, k – хвильове число, n – показник заломлення середовища, $\bar{P}$ – відносна потужність пучка, тобто P/P_{cr} , де P – поточна потужність, а P_{cr} – критична потужність для самофокусування.

Квадратична залежність $g_{S1} = g_0 \cdot (\frac{a_0}{a(z)})^2$ випливає з фізичних принципів гауссового пучка: для лазерного пучка інтенсивність $I(z)$ на осі пучка пропорційна квадрату амплітуди електричного поля $E(z)$ і обернено пропорційна площі поперечного перерізу. Переріз пучка визначається як $\pi a(z)^2$. Математично інтенсивність на осі пучка може бути виражена як:

$$I(z) \propto \frac{E^2(z)}{\pi a(z)^2} \quad (8)$$

Оскільки загальна енергія пучка (або потужність P) зберігається при ідеальному самофокусуванні (без втрат), потужність пов'язана з інтенсивністю через:

$$P = I(z)\pi a(z)^2 \quad (9)$$

Отже $I(z) = P/(\pi a(z)^2)$, та інтенсивність зростає як $1/a(z)^2$ за умови сталої потужності. У процесі вимушеного раманівського розсіювання коефіцієнт підсилення g_{S1} пропорційний інтенсивності накачувального пучка $I(z)$, оскільки ВРР є нелінійним оптичним ефектом, що залежить від щільності фотонів. У загальному вигляді:

$$g_{S1}(z) \propto g_0 \cdot I_L(z) \quad (10)$$

Заміщаючи $I(z) = P/(\pi a(z)^2)$ отримуємо:

$$g_{S1}(z) \propto g_0 \cdot \frac{P_L}{\pi a(z)^2} \quad (11)$$

Однак P_L — це потужність лазера, яка може змінюватися через втрати або перерозподіл енергії (наприклад, на стоксову компоненту), тому потрібно врахувати нормалізацію відносно початкового стану пучка.

Початковий радіус пучка a_0 слугує референтною величиною, що дозволяє виразити відносне звуження пучка під час самофокусування. Якщо $a(z)$ зменшується, співвідношення $a_0/a(z)$ відображає ступінь концентрації енергії. У працях [10], та [13] зазначається, що для коректного опису ефекту самофокусування g_{S1} нормалізується через $(a_0/a(z))^2$, оскільки інтенсивність зростає пропорційно $(a_0/a(z))^2$ порівняно з початковим станом. Це впливає з того, що переріз пучка зменшується як $a(z)^2$, а інтенсивність — як обернена величина до цього перерізу.

Також самофокусування викликає нелінійне стиснення пучка, що призводить до квадратичного зростання інтенсивності через геометричний ефект (зменшення площі перерізу). Оскільки g_{S1} прямо пропорційний інтенсивності, а інтенсивність залежить від $1/a(z)^2$, підсилення також масштабується як $(a_0/a(z))$. Це узгоджується з рівнянням переносу для ВРР:

$$\frac{dI_S}{dz} = g_{S1}I_LI_S \quad (12)$$

Методика дослідження базується на використанні двох незалежних чисельних програм, реалізованих у середовищі Wolfram Mathematica. Ці програми розроблено для моделювання динаміки ВРР у самофокуруючих середовищах, на прикладі толуолу, з урахуванням нелінійних ефектів і змін геометрії пучка.

Крім фізичної обґрунтованості, ключовою вимогою до програм було забезпечення високої швидкодії. Оптимізація коду та адаптація чисельних методів до конкретних фізичних задач дозволили скоротити час обчислень у кілька разів порівняно з універсальними математичними пакетами. Такий підхід відкриває можливості для розширеного параметричного аналізу, що

особливо важливо при розрахунках у режимі реального часу або під час обробки великих обсягів експериментальних даних.

Обидва підходи спираються на фундаментальні закони оптики та нелінійної динаміки, а їх правильність підтверджується узгодженістю з аналітичними рішеннями та експериментальними даними.

Перша програма є чисельним інтегратором, який реалізує метод Адамса (Adams-Bashforth-Moulton) для розв'язання систем диференціальних рівнянь першого порядку. Цей метод належить до багатокрокових методів із змінним кроком і високою точністю, що робить його придатним для моделювання складних нелінійних систем, таких як ВРР. Вона базується на системі рівнянь (1) та (2), з врахуванням явища самофокусування (5). Для більш наглядного порівняння вивід результатів подається у вигляді потужностей, які пов'язані з амплітудами полів за формулами:

$$P_L = \frac{1}{2} c \epsilon_0 n p a_0^2 E_L^2 \quad (13)$$

$$P_{S1} = \frac{1}{2} c \epsilon_0 n p a_0^2 E_{S1}^2 \quad (14)$$

Ці рівняння ґрунтуються на законі збереження енергії пучка та нелінійній залежності показника заломлення від інтенсивності (ефект Керра), описаному в роботах Boyd [2] і Shen [3].

Правильність програми підтверджується її узгодженістю з аналітичним розв'язком для лінійних випадків ($n = 1$) та відповідністю експериментальним даним [4], де порогові значення генерації стокса збігаються з теоретичними прогнозами.

Друга програма реалізує ітераційний метод Ейлера з фіксованим кроком для обчислення потужностей P_L та P_{S1} на основі рівнянь:

$$P_{S1}(z + h) = P_{S1}(z) \exp\left(\frac{G \cdot P_L(z)}{a(z)^n} \cdot h\right) \quad (15)$$

$$P_L(z + h) = P_{L0} - \frac{\lambda_{S1}}{\lambda_L} P_{S1}(z + h) \quad (16)$$

Де, G коефіцієнт комбінаційного підсилення для середовища, h – крок інтегрування по координаті z . Цей підхід базується на законі збереження енергії та експоненційному законі зростання стоксової потужності, виведеному з рівнянь амплітуд через їхню залежність від інтенсивності [8].

Крок інтегрування (h) забезпечує достатню роздільну здатність для моделювання на довжині кювети ($l = 0.25$). Метод Ейлера, хоча й менш точний за Адамса, є стабільним для експоненційних процесів і дозволяє згладжувати нелінійні коливання. Правильність програми підтверджується її відповідністю результатам для ($n = 2$) та узгодженістю з експериментальними даними [4], де профілі потужностей збігаються з теоретичними прогнозами на z_f .

Підсумовуючи правильність обох програм підтверджується кількома факторами: рівняння базуються на законі збереження енергії, рівняннях Максвелла для нелінійних середовищ і ефекті Керра, що є загальноприйнятими в оптичному моделюванні [2, 3]. Незважаючи на різні підходи (диференціальний та ітераційний), результати збігаються щодо порогу генерації та стабілізації, що усуває систематичні помилки. Порогові значення (z_f) і стабілізація узгоджуються з даними [4], що підтверджує фізичну коректність. Використання адаптивного кроку в першій програмі і фіксованого кроку в другій дозволяє уникнути артефактів, характерних для менш точних методів, таких як явний Ейлер без корекції.

Таким чином, обидві програми є надійними інструментами для моделювання ВРР, їх результати можна вважати валідованими для подальшого аналізу.

Моделювання здійснювалося з однаковими вхідними даними для обох програм з параметрами характерними для самофокусуємого середовища толуол. Початковий радіус лазерного пучка становив $a_0 = 113$ мкм, коефіцієнт заломлення середовища $n = 1.49$, довжина хвилі лазерного випромінювання $\lambda_L = 694.3$ – нм, критична потужність $P_{cr} = 25$ кВт.

Результати отримані внаслідок моделювання для обох програм, першої – a та другої – b при степені залежності пучка $n=2$ показані на рисунку 1.

Результати моделювання для квадратичної залежності демонструють узгодженість обох чисельних підходів — методу Адамса (a) та ітераційного методу Ейлера (b). Для першої програми червона крива, що відображає потужність лазерного пучка P_L поступово зменшується від початкового значення 62.5 кВт і стабілізується приблизно на $z \approx 0.085$ м. Перетворення лазерної компоненти у стоксову здійснюється ефективно (практично повна передача енергії стоксовій компоненті) в зоні самофокусування $z_f \approx 0.083$ що є характерним для самофокусуємого середовища

толуолу. Стоксова компонента P_{s1} після порогу самофокусування демонструє стабільне зростання із подальшою стабілізацією, що відображає ефективність ВРР у самофокусуєчому середовищі.

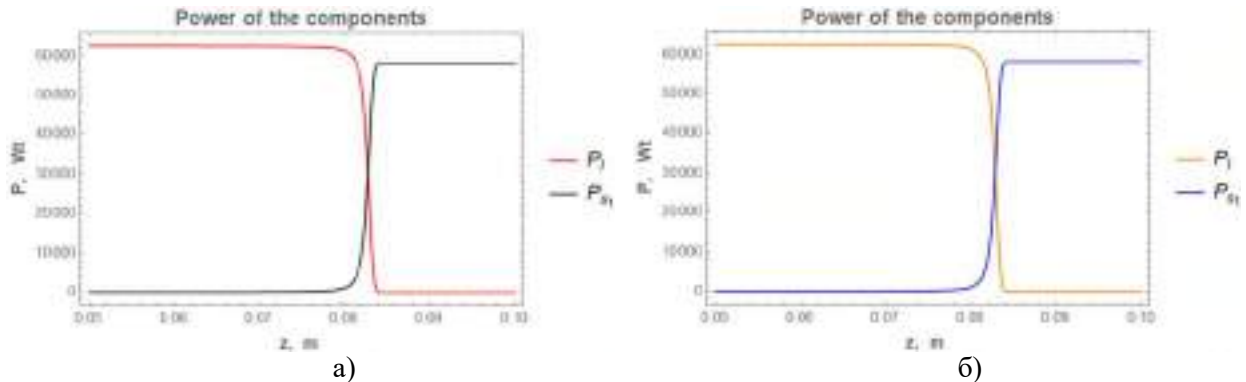


Рис. 1. Трансформація лазерної компоненти в стоксову для методу Адамса (а) та ітераційного метода Ейлера (б) при степені залежності лазерного пучка $n=2$

Друга програма (метод Ейлера) демонструє аналогічну поведінку, проте показує дещо плавний перехід, що не впливає на фінальний результат. Згладженість кривих у методі Ейлера пояснюється фіксованим кроком інтегрування ($h = 0.00001$ м), тоді як різкість у методі Адамса відображає диференціальний підхід із адаптивним кроком.

Ця узгодженість підтверджує фізичну коректність моделі з $n = 2$, оскільки поріг генерації та стабілізація збігаються та відповідають теоретичним прогнозам [2,3].

Результати для лінійної залежності $n = 1$ демонструють некоректну поведінку. Для першої програми хоч і спостерігається певний перехід лазерної компоненти в стоксову, проте він надто розтягнутий та повільний що більш характерно для несамофокусуєчих середовищ. Також спостерігається порушення закону збереження енергії оскільки на значних довжинах кювети $z \approx 0.82$ м. спостерігається значення потужності стоксової компоненти, що перевищують значення вхідної потужності лазерної компоненти.

В свою чергу результати отримані за допомогою ітераційного метода Ейлера демонструють повну відсутність переходу лазерної компоненти в стоксову. Також варто зазначити, що при зміні вхідних параметрів дана модель може демонструвати коректну роботу.

Ці результати відображають недооцінку ефекту самофокусування при $n = 1$, що узгоджується з висновками про меншу чутливість моделі до геометричних змін пучка.

Отже для заданих вхідних параметрів дана модель демонструє некоректну роботу, що свідчить про ризик застосування лінійної залежності при моделюванні ВРР за умов самофокусування.

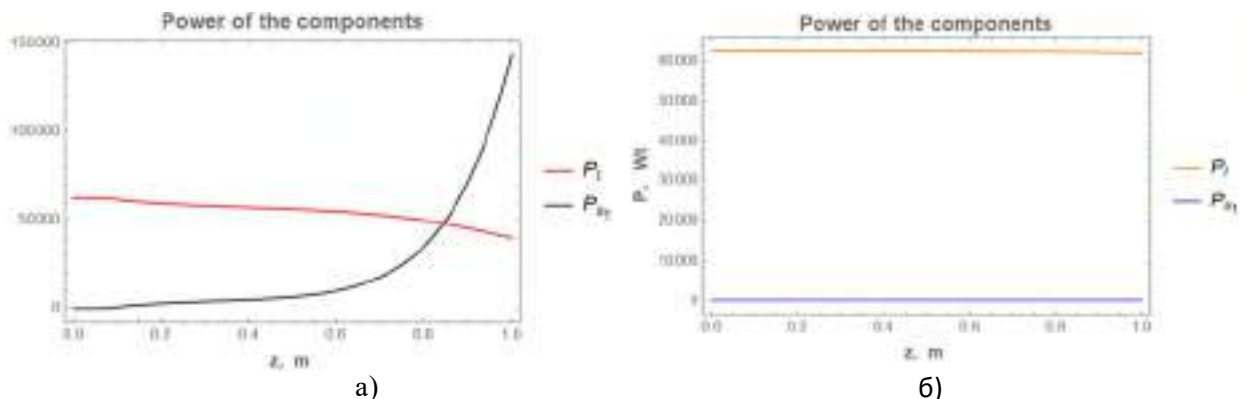


Рис. 2. Трансформація лазерної компоненти в стоксову для методу Адамса (а) та ітераційного метода Ейлера (б) при степені залежності лазерного пучка $n=1$

Для кубічної залежності $n = 3$ метод Адамса демонструє подібні результати при $n=2$, проте зі зміщенням порогу генерації $z_f \approx 0.076$, що відрізняється від теоретичних очікувань самофокусуєчої області для толуолу. Але загальний результат характерний. Друга програма демонструє

невідповідність очікуваному профілю, що пов'язано із виходом розрахункових значень за межі допустимого.

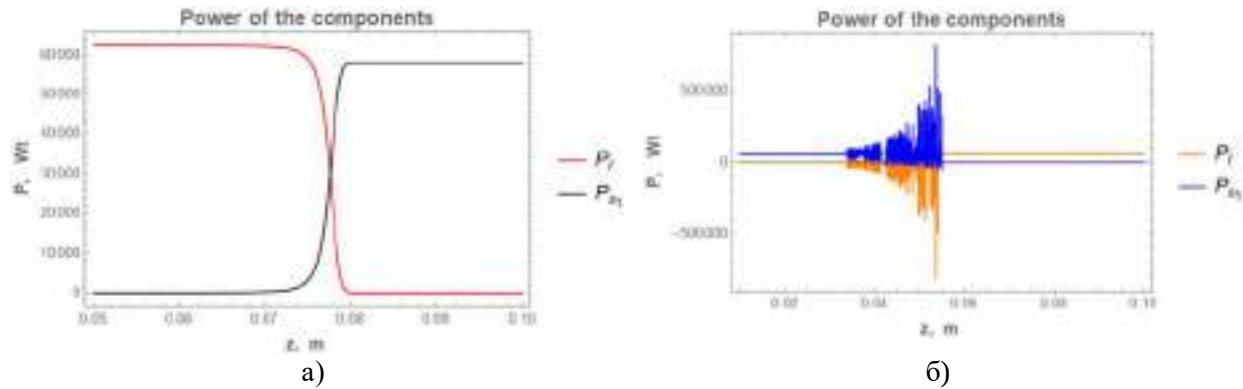


Рис. 3. Трансформація лазерної компоненти в стоксову для методу Адамса (а) та ітераційного методу Ейлера (б) при степені залежності лазерного пучка $n=3$

Ця нестабільність узгоджується з зауваженнями Berge [5] і Etchegoin [10] про чисельні труднощі при високих степенях, пов'язані з колапсом пучка в самофокусуєчому середовищі.

Порівняння результатів для $n=1$, $n=2$ та $n=3$ підтверджує, що квадратична модель $n=2$ забезпечує оптимальну комбінацію стабільності та фізичної коректності. Вона точно відображає поріг генерації на z_f та стабілізацію потужностей, що відповідає експериментальним даним [4]. Лінійна модель $n=1$ недооцінює ефект самофокусування, тоді як кубічна $n=3$ призводить до нестабільності, що ускладнює практичне застосування. Проте за певних вхідних параметрів дані моделі можуть демонструвати коректну роботу.

Також узгодженість результатів обох методів для $n=2$ підкреслює надійність запропонованого підходу для моделювання ВРР у толуолі.

Висновки. У статті проведено дослідження чисельної верифікації фізичної коректності використання квадратичної залежності радіуса лазерного пучка при моделюванні вимушеного раманівського розсіювання (ВРР) у самофокусуєчих середовищах, зокрема на прикладі толуолу.

Розроблено та застосовано два незалежні чисельні підходи — метод Адамса (Adams-Bashforth-Moulton) із адаптивним кроком і ітераційний метод Ейлера з фіксованим кроком — для аналізу впливу різних степенів залежності коефіцієнта підсилення від радіуса пучка ($n = 1$, $n = 2$, $n = 3$), які застосовуються у різних працях.

Результати моделювання, що проводилися із параметрами, характерними для самофокусуєчого середовища толуолу (початковий радіус пучка 113 мкм, коефіцієнт заломлення 1.49, довжина хвилі 694.3 нм, критична потужність 25 кВт), підтверджують, що квадратична модель ($n = 2$) забезпечує оптимальну комбінацію стабільності та фізичної коректності, точно відображаючи поріг генерації стоксової компоненти ($z_f \approx 0.083$ м) і стабілізацію потужностей.

Лінійна модель ($n = 1$) продемонструвала значні недоліки, зокрема порушення закону збереження енергії при великих значеннях z (≈ 0.82 м), що вказує на недооцінку ефекту самофокусування, що узгоджується з висновками сучасних досліджень.

Кубічна модель ($n = 3$) виявила чисельну нестабільність, зокрема зміщення зони самофокусування ($z_f \approx 0.076$ м) і вихід значень за допустимі межі, що підтверджує зауваження Berge [5] та Etchegoin [10] щодо труднощів при високих степенях залежності та ефекту надмірного самофокусування.

Узгодженість результатів обох методів для $n = 2$ підкреслює надійність запропонованого підходу та його відповідність експериментальним даним.

Робота може бути використана для оптимізації лазерних систем у спектроскопії, оптоелектроніці та біомедицині, зокрема для медичної діагностики та фотонних технологій.

Окрім цього, розроблені чисельні програми демонструють не лише фізичну коректність, але й високу продуктивність, що робить їх корисним інструментом для швидкого моделювання складних нелінійних процесів. Надалі планується вдосконалення алгоритмів з метою зменшення часу обчислень і розширення можливостей для інтерактивного аналізу.

Для майбутніх досліджень планується зосередитися на аналізі чутливості моделі до змін умов середовища та інтеграції з реальними експериментальними даними для підвищення її практичної придатності.

Список використаних джерел:

1. C. V. Raman, K. S. Krishnan. A New Type of Secondary Radiation. *Nature*, Vol. 121, No. 3048, 1928, pp. 501–502. URL: <https://doi.org/10.1038/121501c0>
2. R. W. Boyd. *Nonlinear optics* (4th ed.). Academic Press, 2008. URL: <http://lib.ysu.am/disciplines-bk/cce1226f312d5f73b4d8dd86e878c5b3.pdf>.
3. Shen Y.R. *The principles of nonlinear optics*. Wiley, 2003. 432 p. URL: <https://www.scribd.com/document/335202876/Principles-Of-Nonlinear-Optics-Y-R-Shen-pdf>
4. Іванісік А. І. Динаміка нелінійно-оптичних процесів у керованих рідинах : дис. д-ра фіз.-мат. наук : 01.04.05 «Оптика, лазерна фізика» – Київ, 2015. – 343 с.
5. Berge, L. (2008) *Wave Collapse in Physics: Principles and Applications to Light and Plasma Waves*. *Physics Reports*, 303, 259–370.
6. S. Siddhanta, A. N. Kuzmin, A. Pliss, A. S. Baev, S. K. Khare, P. K. Chowdhury, A. K. Ganguli, P. N. Prasad. *Advances in Raman spectroscopy and imaging for biomedical research*. *Advances in Optics and Photonics*, Vol. 15, Issue 2, pp. 318–384, 2023. URL: <https://doi.org/10.1364/AOP.479884>
7. Manifold B., Fu D. Quantitative stimulated Raman scattering microscopy: Promises and pitfalls. *Annual Review of Analytical Chemistry*. 2022. Vol. 15. P. 269–289. <https://doi.org/10.1146/annurev-anchem-061020-015110>
8. Dudka S.O., Ivanisik A.I., Konopatskiy A.V., Loboda V.D. Disposition of the focal point in a self-focusing environment. *Bulletin of Taras Shevchenko National University, Series: Physics & Mathematics*. 2005. No. 3. P. 259–267.
9. M. Shoucri, B. Afeyan. *Stimulated Raman Scattering with a Relativistic Vlasov–Maxwell Code: Cascades of Nonstationary Nonlinear Kinetic Interactions*. Open Access; 2014. URL: <https://doi.org/10.5772/57476>
10. P. Etchegoin, R. T. Phillips. Stimulated Raman scattering produced by self-focusing in liquid crystals. *Phys. Rev. E*, Vol. 54, p. 2637, 1 September 1996. URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.54.2637>
11. P. Lallemand, N. Bloembergen. Self-Focusing of Laser Beams and Stimulated Raman Gain in Liquids. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 15, No. 23, pp. 1010–1013, 27 December 1965. URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.15.1010>
12. A. M. Weiner, S. J. Barden, D. E. Leaird. Limitations of the Linear Raman Gain Approximation in High-Power Fiber Amplifiers. *Optics Express*, Vol. 18, Issue 24, pp. 25449–25460, 2010. URL: <https://doi.org/10.1364/OE.18.025449>
13. B. Hafizi, J. P. Palastro, J. R. Penano, T. G. Jones, L. A. Johnson, M. H. Helle, D. Kaganovich, Y. H. Chen, A. B. Stamm. *Stimulated Raman and Brillouin scattering, nonlinear focusing, thermal blooming and optical breakdown of a laser beam propagating in water*. *Journal of the Optical Society of America B*, Vol. 33, No. 10, pp. 2062–2072, 2016. URL: <https://doi.org/10.1364/JOSAB.33.002062>
14. C. W. Freudiger, W. Min, B. G. Saar, S. Lu, G. R. Holtom, C. He, J. C. Tsai, J. X. Kang, X. S. Xie. Label-Free Biomedical Imaging with High Sensitivity by Stimulated Raman Scattering Microscopy. *Science*, Vol. 322, No. 5909, pp. 1857–1861, 26 December 2008. URL: <https://doi.org/10.1126/science.1165758>
15. Zhang Y., Li X., Chen G. Hybrid models for stimulated Raman scattering in multi-component media. *Optics Express*. 2020. Vol. 28. P. 14567–14579

Г.Д. Ільницька¹, В.Є. Діюк², В.І. Лавріненко¹, В.В. Смоквина¹, О.Б. Логінова¹,
І.М. Зайцева¹, С.П. Старик¹

Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України¹
Київський національний університет імені Тараса Шевченка²

ПОВЕРХНЕВІ ВЛАСТИВОСТІ АЛМАЗНИХ ШЛІФПОРОШКІВ МАРКИ AC250 РІЗНИХ ЗЕРНИСТОСТЕЙ

У статті представлені результати дослідження поверхневих властивостей алмазних шліфувальних порошків марки AC250 з розміром зерна 630/500 та 500/400 (згідно з нормативною документацією України). Дослідження структурно-сорбційних властивостей поверхні шліфувальних порошків проводилося об'ємним методом адсорбції-десорбції азоту за стандартною процедурою. Показано, що, незважаючи на більший розмір кристалів алмазу, зразок з розміром зерна 630/500 має більшу питому площу поверхні (0,21 та 0,18 м²/г відповідно) та об'єм пор 1,99 проти 1,75×10⁻⁴ мл/г, порівняно зі зразком з розміром зерна 500/400. Цей результат зумовлений меншим середнім радіусом пор для зразка з розміром зерна 630/500, порівняно зі зразком з розміром зерна 500/400. Водночас, досліджувані зразки мають питому поверхню приблизно в 50–70 разів більшу, ніж площа поверхні ідеальних кристалів алмазу відповідного розміру зерна, та підвищену гідрофільність, що є результатом наявності точкових дефектів у поверхневому шарі зразків.

Ключові слова: алмазні шліфувальні порошки, питома поверхня, об'єм та розмір пор, гідрофільність, концентрація азотовмісних дефектів.

H.D. Ilynyska, V.E. Diyuk, V.I. Lavrinenko, V.V. Smokvyna, O.B. Loginova, I.M. Zaitseva,
S.P. Starik

SURFACE PROPERTIES OF DIAMOND GRINDING POWDERS OF THE AC250 BRAND OF DIFFERENT GRAIN SIZES

The paper presents the results of the study of the surface properties of diamond grinding powders of the AC250 brand with grain sizes of 630/500 and 500/400 (according to the normative documentation of Ukraine). The study of the structural and sorption properties of the surface of the grinding powders was carried out by the volumetric method of nitrogen adsorption-desorption according to the standard procedure. It is shown that despite the larger size of the diamond crystals, the sample with grain size of 630/500 has a larger specific surface area (0.21 and 0.18 m²/g, respectively) and a pore volume of 1.99 versus 1.75×10⁻⁴ ml/g, compared to the sample with grain size of 500/400. This result is due to the smaller average pore radius for the sample with grain size of 630/500, compared to the sample with grain size of 500/400. At the same time, the studied samples have a specific surface area approximately 50–70 times larger than the surface area of ideal diamond crystals of the corresponding grain size, and increased hydrophilicity, which is the result of the presence of point defects in the surface layer of the samples.

Keywords: diamond grinding powders, specific surface area, pore volume and size, hydrophilicity, concentration of nitrogen-containing defects

Introduction and problem statement. In industry, during mass production of machine parts, precision plunge grinding of difficult-to-machine materials is becoming increasingly widespread, which ensures high-performance and high-quality processing of parts of complex shape, high accuracy and stability of the quality of the processed products. To carry out such processing, straightening rollers are used. At present, considerable experience has been accumulated in the design and manufacture of straightening rollers, which are equipped with high-strength diamond grinding powders of grades AC200 - AC400.

When growing diamond crystals in various growth media, depending on the growth conditions and after their extraction, sorting and processing, grinding powders with varying degrees of surface defects are formed - from atomically smooth to rough. Surface defects significantly affect the strength characteristics of crystals and the performance of any diamond tool.

The purpose of this work is to study the physico-mechanical and physico-chemical properties of high-strength diamond grinding powders of the AC250 brand with grain sizes of 630/500 and 500/400, which are used for the manufacture of straightening rollers.

Analysis of recent research and publications. High-performance and high-quality processing of parts of complex shape, including those made of difficult-to-machine materials, is provided by precision deep plunge grinding with straightening rollers. When performing such processing, the use of diamond tools is of great importance. In the works of V.I. Lavrinenko, O.O. Pasichny, V.V. Smokvina, it is shown that the performance of such a tool largely depends on the quality of the diamonds used, which is due to the need

© Г.Д. Ільницька, В.Є. Діюк, В.І. Лавріненко, В.В. Смоквина, О.Б. Логінова,
І.М. Зайцева, С.П. Старик

to provide the straightening tool with the maximum possible stability [1-3]. For the manufacture of straightening tools, natural diamond powders of increased strength and grain size are usually used.

At the Institute of Superhard Materials of the National Academy of Sciences (INM of the National Academy of Sciences) for the manufacture of straightening rollers, work was carried out to study the possibilities of replacing natural diamonds with high-strength diamond grinding powders of the AC250 brand, which are obtained in growth environments at high pressures and temperatures (HPHT method). Real diamond crystals obtained from various growth media have surface defects that significantly affect the strength characteristics of the crystals and the performance of any diamond tool [4-6].

Thus, the research of scientists of the Institute of Metallurgical Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine A.A. Shulzhenko, A.L. Maistrenko, G.P. Bogatyreva, G.F. Nevstruev and others convincingly showed a significant influence on the strength characteristics of diamond grinding powders of grain shape, the presence of metal-solvent inclusions and other volumetric and surface defects. The general appearance of diamond grinding powders of grain size 250/200 with a smooth (a), with a partially defective (b) and defective surface is shown in Fig. 1 [6].

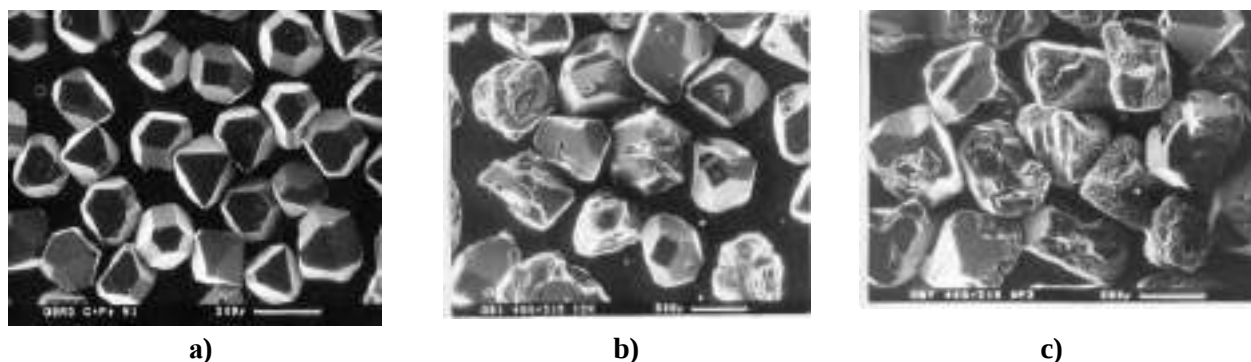


Fig. 1. General appearance of diamond grinding powders with a smooth (a), partially defective (b) and defective surface (c) [6].

In Fig. 1, one can visually note their noticeable differences, which should be considered as extreme manifestations of the defectivity of the surface of diamond crystals. In fact, there is a continuous series of the state of the surface of diamond crystals from smooth to defective. Moreover, there is no sharp boundary between crystals with a smooth surface and crystals with only a defective surface. It can be observed that on the surface of one crystal there are both areas of a smooth surface and areas with defects. Therefore, when characterizing the defectivity of the surface, it is necessary to take into account the state of the entire surface area of diamond grains.

Materials and methods of research. The research was conducted on diamond grinding powders of the AC250 brand with grain sizes of 630/500 and 500/400, determined according to the regulatory documentation of Ukraine. For diamond samples, the physical and mechanical characteristics were determined using the methods developed at the Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences: strength, as an indicator of strength under static compression (P , H), uniformity in strength (Codn.mits., %); the specific magnetic susceptibility χ (m³/kg) was estimated using the Faraday method; the free energy of water saturation of 1 g of powder was used to estimate hydrophilicity (ΔCS , J/mol-g).

The appearance of diamond grinding powders of different grain sizes was studied using an Axioscope 5 optical microscope (Zeiss, Germany).

The structural and sorption properties of the surface of diamond grinding powders were studied by the volumetric nitrogen adsorption-desorption method at -196 °C using a Quantachrome NovaWin gas adsorption automatic analyzer (Quantachrome, USA) according to a standard procedure. All samples were degassed at 150 °C for 20 hours before measurement. The surface area by the BET method (SBET), the total pore volume (V_S) at $p/p_0 = 0.995 \dots 0.999$ and the average pore radius (width) (R) were determined from the adsorption isotherms using the NovaWin software. The pore size distribution curves were calculated from the isotherms by the QSDFT method within the standard equilibrium model for a carbon surface with slit-like pores.

Spectrometric studies of synthetic diamond powder samples were carried out in the mid-IR range (4000–700 cm^{-1}) with a resolution of 2 cm^{-1} . A Nicolet 6700 Fourier spectrometer (Thermo Fisher, USA) was used to record the diffuse reflectance infrared (DRIFT) spectra of the samples.

Presentation of the main material of the study. Microphotographs of individual crystals of the initial diamond grinding powders of the AC250 brand with grain sizes of 630/500 and 500/400 are shown in Fig. 2 (a, b). Analysis of the surface morphology of individual crystals and their macrostructure did not reveal significant differences between materials of different grain sizes. Most diamond crystals, regardless of size, have macrodefects - chips, inclusions, violation of face symmetry, etc.



Fig. 2. Micrographs of diamond crystals of the AC250 brand with grain sizes: 630/500 (a) and 500/400 (b).

The results of measuring the physical and mechanical characteristics of diamond grinding powders of the AC250 brand with grain sizes of 630/500 and 500/400 are presented in Table 1.

Table 1.
Physical and mechanical characteristics of diamond grinding powders of the AC250 brand of various grain sizes

Grain size, μm	Name of indicators			
	Average particle diameter, d_{average} , μm	Strength, P , H	Specific magnetic susceptibility, $\chi \cdot 10^{-8}$, m^3/kg	Hydrophilicity, ΔC_s , J/mole-g
630/500	565	520	3,8	0,48
500/400	450	395	2,5	0,38

As follows from Table 1, diamond abrasive powders of grits 630/500 and 500/400 differ in strength by 1.3 times, which corresponds to the range of the AC250 grade for these grits. The results of the studies showed that the specific magnetic susceptibility of abrasive powders of grits 630/500 is 1.5 times greater than the specific magnetic susceptibility of diamonds of grits 500/400. The hydrophilicity of the surface of diamonds of grits 630/500 is approximately 1.3 times greater than the hydrophilicity of diamonds of grits 500/400. Since the specific magnetic susceptibility and hydrophilicity of diamond are associated with bulk and surface inorganic impurities, the presence of a correlation between strength, specific magnetic susceptibility, and hydrophilicity indicates that these impurities do not have a negative effect on the strength of AC250 diamond grinding powders.

Nitrogen adsorption-desorption isotherms for the studied samples are similar (Fig. 3). The isotherms have a close to linear form with maximum adsorption of 0.11–0.13 cm^3/g at $p/p_0=0.99$. From the nitrogen adsorption-desorption isotherms, pore size distribution curves were calculated (Fig. 4) and structural and sorption characteristics were determined (Table 2).

The results of measuring the surface characteristics of AC250 diamond samples of different grit sizes are given in Table 2. The results obtained show that AC250 diamond grinding powders of grit sizes 630/500 and 500/400 are characterized by a small specific surface area within 0.18–0.21 m^2/g and a small pore volume of 1.75–1.99 $\times 10^{-4}$ ml/g. Despite the larger size of the diamond crystals, the AC250 sample of grit size 630/500 has a larger specific surface area and pore volume compared to the sample of grit size 500/400. This result is due to the smaller average pore radius for the sample with grit size 630/500 compared to the sample with grit size 500/400.

For diamonds of the AC250 brand, regardless of grain size, a broadened maximum is observed on the pore size distribution curves at 1.57–1.64 nm (half-width of the pore) (Fig. 4). The position of this maximum shifts to the region of larger values with a decrease in the grain size of the sample. The studied samples contain a small number of mesopores of various sizes - from 2 to 32 nm.

Table 2.

Average particle diameter and structural and sorption characteristics of diamond grinding powders of the AC250 brand of various grain sizes

Grain size, μm	Name of indicators			
	Average particle diameter, daverage, m	Specific surface area, S_{BET} , m^2/g	Pore volume 10^4 , V , cm^3/g	Average pore radius, R , nm
630/500	565	0,21	1,99	18,7
500/400	450	0,18	1,75	19,3

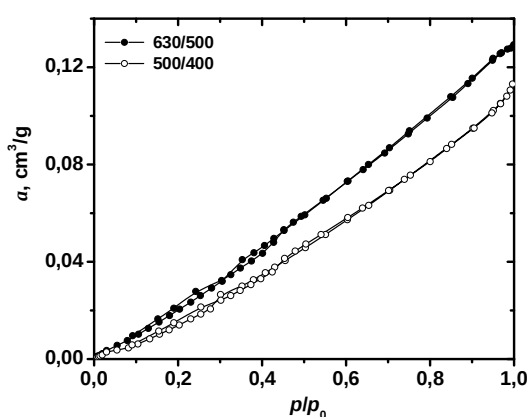


Fig. 3. Nitrogen adsorption-desorption isotherms for AC250 diamond grinding powders of various grain sizes.

The absence of micropores is fully consistent with the small values of the specific surface area and the ordered crystal structure of the samples. At the same time, the studied materials have a specific surface area approximately 50–70 times larger than the surface of ideal diamond crystals of the corresponding grain size. Thus, the results of adsorption studies indicate the presence of point defects in the surface layer of the samples.

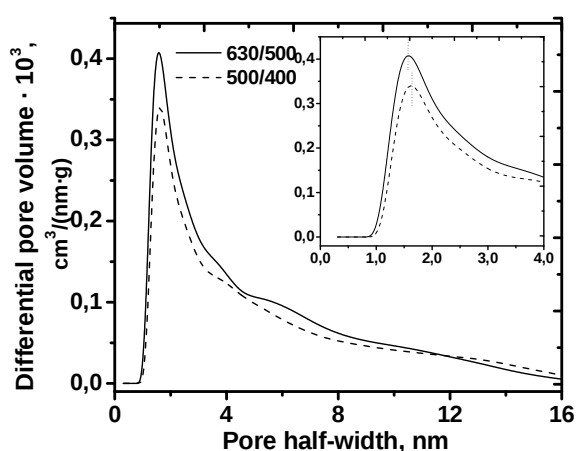


Fig. 4. Pore size distribution curves for AC250 diamond grinding powders of various grit sizes.

The diffuse reflectance IR spectra of the studied diamond grinding powders are shown in Fig. 5. The intense bands at 2160, 2030 and 1970 cm^{-1} and in the range 2540–2430 cm^{-1} are due to vibrations of the diamond crystal lattice [7, 8]. The spectral region 4000–3000 cm^{-1} is uninformative and the type of spectra in this region coincides with the zero line. In the studied spectra, no significant absorption was detected in the range 1570–1480, which indicates the absence of a graphitic or amorphous carbon phase. The low-intensity bands at 2925 and 2848 cm^{-1} correspond to symmetric and asymmetric stretching vibrations of the C–H bond. These bands for the 500/400 grit sample are larger than those for the 630/500 grit sample, which is fully consistent with the hydrophilicity of these samples. The intensity of these bands can be used as a measure of the hydrogenation of the diamond surface and the presence of surface C–H defects.

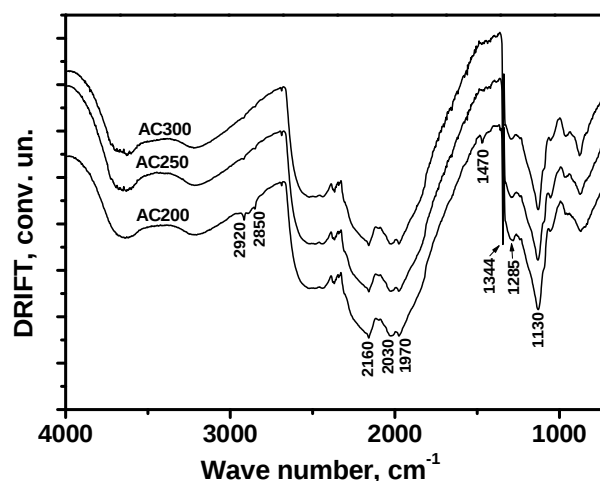


Fig. 5. IR diffuse reflectance spectra of synthetic diamond grinding powders of AC250 grade of various grain sizes.

A series of intense bands in the range of 1360–700 cm^{-1} corresponds to multiphonon vibrational lattices of diamond and/or nitrogen-containing clusters [9, 10]. Absorption bands at 1289, 1344 and 1130 cm^{-1} are due to nitrogen impurities in the form of the so-called A-, B- and C-centers, respectively. For yellow diamonds (type Ib) obtained by the HPHT method, the band at 1130 cm^{-1} has the highest intensity, which indicates the presence of single nitrogen atoms in the diamond crystal lattice. The relative content of nitrogen substitution defects was calculated as the ratio of the band intensity for the nitrogen-containing defect (1130, 1289 and 1344 cm^{-1}) to the intensity of the diamond band (2160 cm^{-1}) (Table 3).

Table 3.

Relative content of defects in diamond grinding powders of AC250 grade of different grain sizes

Grain size, μm	Relative content of nitrogen substitution defects		
	A-centers (1285 cm^{-1})	A-centers (1285 cm^{-1})	A-centers (1285 cm^{-1})
630/500	0,560	0,558	0,850
500/400	0,585	0,587	0,916

As can be seen from the data in Table 3, there is a clear relationship between the relative content of nitrogen-based defects and the strength of the samples (Table 1). The 620/500 grit diamond grinding powder sample has a lower content of A-, B- and C-centers and a higher strength compared to the 500/400 grit sample. Therefore, the use of diffuse reflectance IR spectroscopy to determine the relative concentration of nitrogen-based defects is the best method for predicting the mechanical properties of crystalline diamond powders of this grade.

Thus, the physicochemical and physicomechanical characteristics of diamond grinding powders of the AC250 grade with grain sizes of 630/500 and 500/400 were investigated. Based on the nitrogen adsorption-desorption isotherms, it can be stated that these diamond grinding powders have a surface area close to geometric (less than 1 m^2/g), which indicates an ordered crystal structure with a small number of pores. However, despite the larger specific surface area and a larger number of point defects, the strength of the sample with grain size of 630/500 is 1.3 times higher than that of the sample with grain size of

500/400. The established correlation between strength, specific magnetic susceptibility and hydrophilicity requires further research, including for diamond grinding powders of other grades. One possible explanation for such an unusual combination of a larger number of impurities and higher strength for crystals of grain size 630/500, compared to 500/400, may be the different, depending on the grain size, distribution of impurities in diamond crystals. The presence of metallic impurities, which are located directly in the reaction zone, has a positive effect on the size of diamond crystals due to catalytic acceleration of the speed of transport processes and growth of diamond nuclei. It is likely that the high speed of carbon transfer processes during the growth of the diamond phase will contribute to the formation of more ordered crystals, in which impurities do not form intracrystalline inclusions and do not have a negative effect on the structure and strength.

References

1. Lavrinenko V.I. *Superhard abrasive materials in machining: encyclopedic reference*, (Kyiv, ISM HAS of Ukraine, 2013) [in Ukrainian].
2. Lavrinenko V. I., Ilnitskaya H. D., Sheiko M. M., Dobroskok V. L., Osroverh Ye. V., and Solod V. Yu. Improving the Performance Characteristics of Synthetic Diamonds for High-Precision Diamond Dressing Tool. *Sci. in nov.* 2021. V. 17, no. 6. P. 72–82. https://doi.org/10.15407/sci_nov17.06.072
3. Ilnitskaya H. D., Lavrinenko V.I, Smokvyna V. V.. Diamonds for grinding tools obtained in different systems. . Kyiv. Scientific opinion. 2021. 168 p.) [in Ukrainian].
4. Prikhna T.O., Ilnytska H.D., Lavrinenko V.I., Zaitseva I.N., Sheiko M.N., Smokvyna V.V., and Tymoshenko V.V. Improvement of Physical and Mechanical Characteristics of Synthetic Diamond Powders Synthesized from Ferroalloys for Increasing the Wear Resistance of the Diamond Dressing Tool // *Journal of Superhard Materials*, 2022, Vol. 44, No. 2, pp. 139-150. doi.org
5. Shulzhenko A.A., Prikhna T.O., Ilnytska H.D, Lavrinenko V.I, Borymskii O.I., Sokolov A.N., Tkach V.N., Smokvyna V.V., Zaitseva I.N., Tymoshenko V.V. Comparison of the Dimensional, Physical, Mechanical, and Operational Characteristics of AS6 and AS20 Synthetic Diamond Powders Synthesized in the Ni-Mn-C and Fe-Si-C Systems. *Journal of Superhard Materials*, 2021, Vol. 43, No. 1, pp. 1-14.
6. N0vikov N.V, Ilnitskaya H. D., Bogatyreva H. P., Ntvstruev G.F., Leshchenko O. V., Zaitseva I.N. Metal micro- and nanoparticles in the processes of separation of powders of superhard materials // *Nanosystems, nanomaterials, nanotechnologies: Collection of scientific papers*. Volume 7, issue. 4 – K.: PBB IMФ, 2009. – C. 1177–1194 [in Russianin].
7. Chao F., Yuewen Z., Zhuangfei Z., Chongxin S., Weixia S., Xiaopeng J. Preparation of “natural” diamonds by HPHT annealing of synthetic diamonds. // *CrystEngComm*. – 2018. – Vol. 20, – P. 505–511. DOI: 10.1039/c7ce02013a
8. Yamaguchi T., Higuchi M., Shimada S., Tanaka H., Obata K. Scientific screening of raw diamond for an ultraprecision cutting tool with high durability. // *CIRP Annals*. – 2006. – Vol. – 55, Issue 1. – P. 71–74. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60369-2
9. Wang M., Shi G., Yuan J., Han W., Bai Q. Spectroscopic Characteristics of Treated-Color Natural Diamonds. // *Journal of Spectroscopy*. – 2018. – 8153941. DOI: 10.1155/2018/8153941
10. Ashfold M. N. R., Goss J. P., Green B. L., May P. W., Newton M. E., Peaker C. V. Nitrogen in Diamond // *Chemical Reviews*. – 2020. – Vol. 120, Issue 12. – P. 5745–5794. DOI: 10.1021/acs.chemrev.9b00518

Reviewer: Moschil Viktor Evgenovich, Deputy Head of Department, Senior Researcher of the V.M. Bakul Institute of Superhard Materials, NAS of Ukraine, Ph.D.

Н.Ю. Імбірович¹, Ю.В. Шишко², В.В. Ткачук¹, І.В. Боярська¹, Д.А. Гусачук¹

РЕЖИМИ СИНТЕЗУ КОНВЕРСІЙНИХ ПЛАЗМОЕЛЕКТРОЛІТНИХ ПОКРИТТІВ НА ЦИРКОНІЄВІЙ ОСНОВІ ТА ЇХ КОРОЗІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ

Луцький національний технічний університет¹

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»²

Метою роботи було проведення спектрального аналізу електролітичної плазми. Було встановлено, що температура плазми, в якій утворюється високотемпературний оксид, становить 8000-500 К. Досліджено вплив складу електроліту та співвідношення густин струму на електрофізичні параметри плазмоелектролітного окислення.

Під час дослідження було досліджено корозійну стійкість в такому агресивному середовищі, як 10% HCl. В результаті експериментів було встановлено, що отримані оксидокерамічні покриття характеризуються високою мікротвердістю та корозійною стійкістю.

Ключові слова: плазмоелектролітне окиснення, оксидокерамічні покриття, захисні покриття, мікроструктура, корозійні властивості, обробка поверхні.

N.Yu. Imbirovych, Yu, V. Shyshko, V.V. Tkachuk, I. V. Boiarska, D. A.Husachuk

SYNTHESIS MODES OF CONVERSION PLASMA-ELECTROLYTIC COATINGS ON ZIRCONIUM BASIS AND THEIR CORROSION PROPERTIES

The aim of the work was to conduct a spectral analysis of electrolytic plasma. It was established that the plasma temperature in which the high-temperature oxide is formed is 8000 500 K. The influence of the electrolyte composition and the ratio of current densities on the electrophysical parameters of plasma-electrolytic oxidation was investigated.

During the research, a study of corrosion resistance in such an aggressive environment as 10% HCl was conducted. As a result of the experiments, it was found that the obtained oxide-ceramic coatings are characterized by high microhardness and corrosion resistance.

Key words: plasma electrolytic oxidation, oxide ceramic coatings, protective coatings, microstructure, corrosion properties, surface treatment.

Statement of the problem. Due to its properties, zirconium and alloys based on it are widely used in various industries. For example, zirconium alloys have found their application in nuclear power engineering for the manufacture of shells of heat-generating elements with an increased operating temperature, channel pipes, etc. Such use is due to the ability of zirconium to have a low thermal neutron capture and high corrosion resistance [1]. Of course, the use of zirconium is not limited to the nuclear power industry. Alloys based on it are also attractive for chemical engineering, as a structural material with high anti-corrosion properties in acids and aqueous environments. Zirconium is an inert material in biological environments, and therefore promising in the medical industry. Due to this property, implants in dentistry and traumatology, as well as surgical instruments, are made from zirconium alloys [2, 3].

Protective coatings on alloy products, as is known, must meet many requirements, the most important of which are: sufficient adhesion of coatings to the substrate (base), uniformity in thickness, low porosity and, accordingly, high corrosion resistance, satisfactory mechanical properties (hardness, wear resistance). These and other characteristics depend on the method of coating application, the technological conditions of its formation, the nature and composition of the alloy.

In modern mechanical engineering, metals with low specific gravity and high corrosion resistance are widely used, for example, aluminum and titanium alloys, but their characteristics are often limited by low wear resistance and strength, the thickness of the protective film to various types of damage.

Most methods for protecting metal from corrosion are aimed at weakening or preventing the appearance of corrosion. Plasma electrolytic oxidation (PEO) has recently been considered a promising method for surface protection of light alloys against corrosion and mechanical damage [4].

The PEO method makes it possible to obtain coatings on metal surfaces that are identical in physicochemical properties (hardness, heat, wear, and corrosion resistance) to refractory ceramic materials [5]. The combination of functional properties with the decorative appearance of products obtained by this method makes it possible to use them in rocketry, shipbuilding, aviation, as well as in building decoration, etc.

Analysis of recent research and publications. Plasma-electrolytic oxidation (other names: microplasma, anodic spark, microarc) is one of the most promising methods of surface treatment of materials. The essence of the method is that when a high-density current passes through the metal-

electrolyte interface, conditions are created when the tension at the interface becomes higher than its dielectric strength and micro-plasma discharges with high local temperatures and pressures appear on the electrode surface. The result of the action of micro-plasma discharges is the formation of a coating layer consisting of oxidized forms of the elements of the base metal and components of the electrolyte. Depending on the modes of plasma-electrolytic oxidation (PEO) and the composition of the electrolyte, ceramic coatings with unique characteristics and a very wide range of applications can be obtained [6].

The advantages of the method are the ability to create ultra-strong coatings with unique characteristics, obtaining several protective characteristics in a complex, practically infinite service life of the electrolyte, the ability to process complex profile parts, high dispersion ability of the electrolyte (the coating is applied into holes and planes without difficulties), there is no need for special surface preparation before applying the coating and mechanical treatment after applying the coating, obtaining different coatings on the same material.

Setting tasks. The aim of the study was to investigate the corrosion resistance of oxide-ceramic coatings synthesized on a zirconium alloy Zr-2.5%Nb in an alkaline electrolyte of the composition 10 g/l KOH + 15 g/l liquid glass (the electrolyte base is distilled water).

Presentation of the main material. In general, the production line for PEO coatings consists of: power equipment (specialized power supplies); baths in which surface preparation, processing and washing are carried out; a manipulator for moving the suspension with parts (in the case of serial production); metal structures for placing baths and a manipulator; auxiliary equipment - a distiller, a pump-filter for cleaning and pumping solutions; reserve tanks, devices for controlling the quality of the coating and the state of the electrolyte.

The process of coating formation takes place in an electric field, which is a source of energy for plasma-chemical reactions on the working electrode. At a certain voltage, a sharp heating of the thin channel in the oxide layer occurs, and the current there is interrupted due to the formation of a vapor-gas bubble, due to the evaporation and electrolysis of the electrolyte. With a further increase in voltage, an electric spark breakdown of this bubble occurs, which is accompanied by a sharp thermal increase in its volume, and, accordingly, the interelectrode distance in the discharge channel - the voltage to maintain it begins to be insufficient, and the spark discharge is extinguished. After the discharge is extinguished, the bubble cools sharply and contracts, which is accompanied by a crackling characteristic of anodizing in a spark discharge. Galvanoluminescence, the valve effect, spark discharge at the anode, and electric breakdown of oxide films continue to be studied today [7]. In the breakdown channel, the temperature increases sharply, dissociation and ionization of the electrolyte occur, and a plasma clot is formed, in which plasma-chemical reactions of oxide synthesis take place.

In this work, the zirconium alloy Zr-2.5%Nb was investigated. The experiments were carried out in alkaline electrolytes based on distilled water of the following composition: 3 g/l KOH + 2 g/l liquid glass, 10 g/l KOH + 15 g/l liquid glass, 10 g/l KOH + 15 g/l liquid glass + 0.1 g/l GrO_3 , 10 g/l KOH + 15 g/l liquid glass + 0.1 g/l GrO_3 + 10 g/l glycerin, 10 g/l KOH + 15 g/l liquid glass + 0.1 g/l GrO_3 + 10 g/l glycerin + 10 g/l H_2O_2 , 10 g/l KOH + 15 g/l liquid glass + 0.1 g/l GrO_3 + 18 g/l glycerin + 10 g/l H_2O_2 . To achieve homogeneity of the electrolyte concentration throughout the volume, it was constantly stirred with air. Chromium oxide GrO_3 (VI), which is a strong oxidizer, is obtained by the action of excess concentrated H_2SO_4 on a saturated aqueous solution of potassium dichromate. Acidic chromium oxide, reacting with alkalis, forms chromates CrO_4^{2-} . The synthesis of oxide ceramics was carried out at different ratios of the anode current to the cathode current (I_a / I_c): 20/20 A / dm^2 , 10/15 A / dm^2 , 10/10 A / dm^2 , 20/30 A / dm^2 . Synthesis time from 20 to 60 min.

To solve this problem, the dependences of voltage change over time at a constant current density in the process of synthesis of a coating on titanium and zirconium alloys were constructed. The Faraday region is an integral part of the process at the pre-spark stage, and its duration depends on the method of implementing the process and the rate of voltage growth to the sparking potential.

Electrical parameters for the synthesis of oxide-ceramic coating (OCC) are selected mainly experimentally, without proper theoretical justification. However, it is the ratio of the anodic current to the cathodic current (I_a/I_c) and the voltage that determine the nature and intensity of the discharges, and also affect the temperature conditions on the alloy surface. These parameters also affect the functional characteristics of the formed coating, such as hardness, wear resistance, and corrosion resistance. When synthesizing OCC, the stage of spark discharge formation on the sample surface is important. Studies of voltage changes during the synthesis of oxide-ceramic coating on zirconium alloy Zr-2.5%Nb have shown that with the growth of the coating, the voltage on the anode smoothly decreases. An increase in the anodic

potential outside the Faraday region leads to a breakdown of the dielectric or semiconductor film of the anode, which is formed when passing the Faraday region (Fig. 1a). The breakdown occurs due to the injection of electrons from the valence band to the conduction band.

The formation of the OCP on the zirconium alloy occurs in two stages: in the first seconds, the anode voltage U_a increases by about 5...10 V (Fig. 1a, stage I), here the formation of the primary oxide film occurs by the electrochemical mechanism. The only reaction on the anode at a voltage of up to 100 V is the anodic growth of the oxide. In this case, the overvoltage of oxide formation is less than the voltage of electrolyte decomposition. At the second stage of the formation of the spark discharge channel in the “metal – oxide – electrolyte” system, with a further increase in voltage during the synthesis of the coating, a breakdown of this channel by electrons occurs.

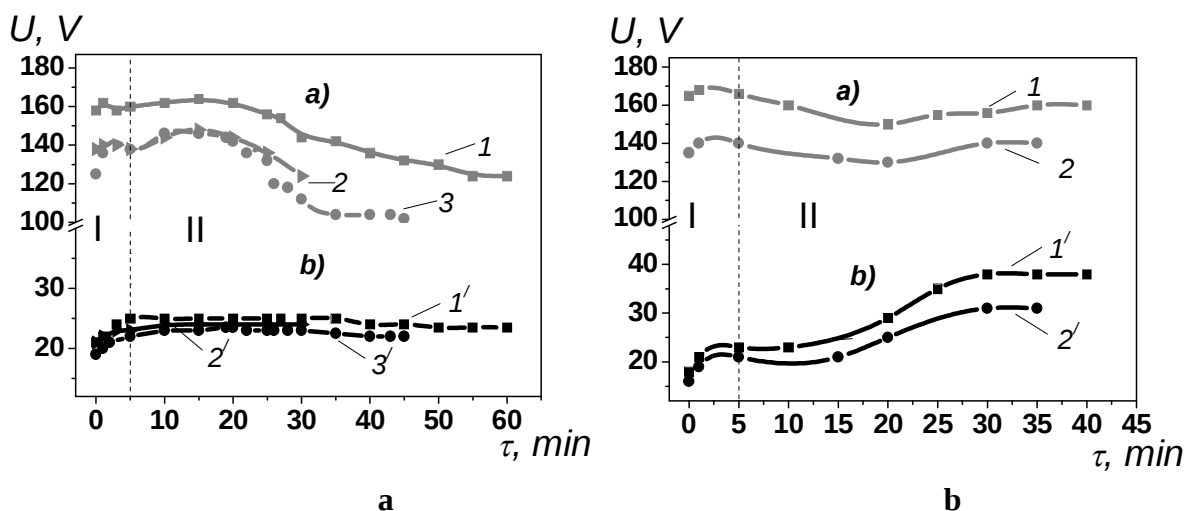


Fig. 1. Dependence of the anodic a) and cathodic b) voltages on the time of synthesis on zirconium alloy electrodes in electrolyte (a): 3 g/l KOH+2 g/l liquid glass with different current densities I_a/I_c : 1, 1/ - 20/20 A/dm², 2, 2/ - 10/15 A/dm², 3, 3/ - 10/10 A/dm²; (b): 10 g/l KOH+15 g/l liquid glass with different current densities I_a/I_c : 1.1/ - 20/20 A/dm², 2, 2/ - 10/10 A/dm²

During the synthesis of the anodic spark coating on the zirconium alloy, a slight increase in the anodic U_a and cathodic U_c voltages is observed with an increase in the concentration of KOH and liquid glass in the electrolyte (Fig. 1a, b). With an increase in the concentration of KOH and liquid glass (Fig. 1b, stage II) the process of coating formation stabilizes and occurs uniformly. Only with the addition of 10 g/l H_2O_2 at the stage of coating formation does the voltage begin to gradually decrease (Fig. 2, field II).

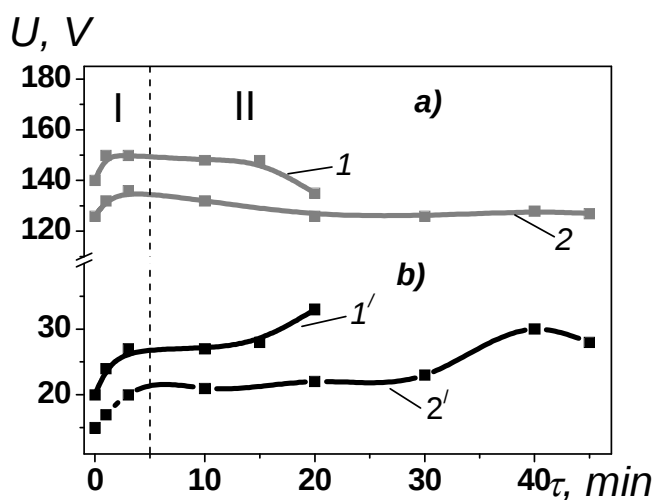


Fig. 2. Dependence of anodic (a) and cathodic (b) voltage on the synthesis time on zirconium alloy electrodes in an electrolyte 10 g/l KOH + 15 g/l liquid glass + 0.1 g/l GrO_3 + 18 g/l glycerol + 10 H_2O_2 with different current densities: 1, 1/ - 20/30 A/dm², 2, 2/ - 10/15 A/dm².

A single reaction on the anode at a voltage of up to 100 V results in anode growth of the oxide. In this case, the overvoltage is created by the mensch oxide due to the voltage of the electrolyte.

Thus, the electrophysical parameters of the process of synthesis of OKP on zirconium alloy depend on the composition of the electrolyte and the ratio of the density of the anodic current to the cathodic current. Thus, in the least concentrated electrolyte, which contains alkali and liquid glass, the synthesis is uneven, which affects the quality of the coating. Such a coating does not completely cover the surface of the metal, forming islands of synthesized oxide on the surface (Fig. 3) and, therefore, is not of high quality.

Plasma electrolyte coating is inert. One of the explanations in them is that there are various options for compounds that can lead to the destruction of metal or alloy. All this reduces the functionality of the power and will soon end the use of the alloy. Due to the fact that the corrosion chemistry of plasma-electrochemical coatings on zircon and titanium alloys in various corrosive-aggressive environments is revealed and it is important for their corrosion jets, for these they judged the speed of corrosion alloys.

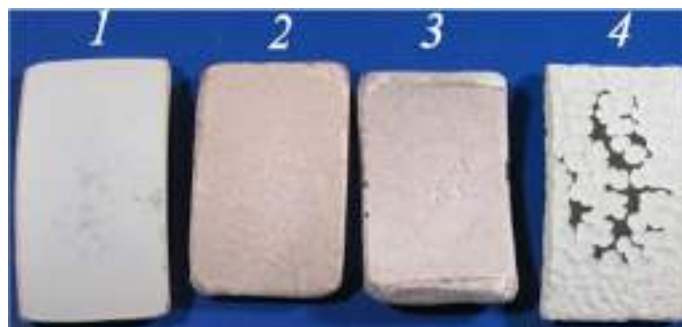


Fig. 3. Oxide-ceramic coatings on zirconium alloy (processing modes are given in Table 1)

Table 1

Processing modes of oxide-ceramic coatings on zirconium alloy

№	Electrolyte composition, g/l			I_a/I_c , A/dm ²	τ , min	H_{μ} , GPa	Thickness, mm
	KOH	Liquid glass	GrO ₃				
1	5	5	—	14/20	30	9	70...100
2	10	15	—	20/20	40	16	70...130
3	10	15	0,1	20/20	30	10	90...160
4	3	2	—	20/20	30	14	20...50

After the formation of the OCC, corrosion processes are essentially galvanized. In hydrochloric acid environments, corrosion flows, which are reduced in a curve against the matrix in the order.

It is seen that high corrosion power of zirconium is allowed into a thin-walled acidified liquid of oxides partially ZrO₂ (Table 2). However, respected minds, engaged and declaring personally aggressive middle peasants (including in the case of robots) chickens, within the limits of small thickness and low rigidity, do not exclude high anti-corrosion powers.

Corrosion jets covered this, which judged the speed of corrosion of the material, reducing all the systems used.

The corrosion potential of the corrosion-German zirconium alloy when diluted with 10% HCl has a negative value of -370 mV (Fig. 4 a), the corrosion jet is 80 mA / m².

When forming this alloy, OCC produces softening by 1...2 serial places in the electrolyte warehouse, where the tires were synthesized. Since it is synthesized in a low-concentration electrolyte, which is the case with alkali and glass, it is possible to find lower corrosion activity because of this, which were synthesized in more concentrated electrolytes and have a value of $1,2 \cdot 10^{-3}$ A/m² (Fig. 4 a, curve 4). With an additional increase in the concentration of electrolyte on the streams of corrosion and cor OCC are reduced.

The coating obtained in an electrolyte of 10 g/l KOH + 15 g/l rs has a corrosion current value of $1,39 \cdot 10^{-4} \text{ A/m}^2$, and when 10 g/l H_2O_2 is introduced into the electrolyte, the i_{cor} decreases to a value of $1,21 \cdot 10^{-4} \text{ A/m}^2$.

This result is obviously associated with the combination of high hardness and thickness of the coating.

Conclusions. Plasma is formed within 3...5 min (initial section of the curve), the voltage in this section increases. Further increase in the electrolyte concentration by increasing the content of the main composition of KOH and liquid glass and by introducing additional chromium stabilizes the synthesis process. The current ratio does not change the nature of the voltage dependences on time, i.e. does not affect the stability of the synthesis process. A decrease in currents reduces the anodic and cathodic components of voltage, and this in turn affects the properties of the coatings. The most favorable conditions for the formation of oxide are formed at a current density ratio of $I_a/I_c=1,5$ and at a relatively low electrolyte concentration of 10 g/l KOH+15 g/l liquid glass. Studies of the corrosion properties of plasma-electrolytic coatings showed that the corrosion currents of the OCC for all studied systems are reduced by 2...3 orders of magnitude.

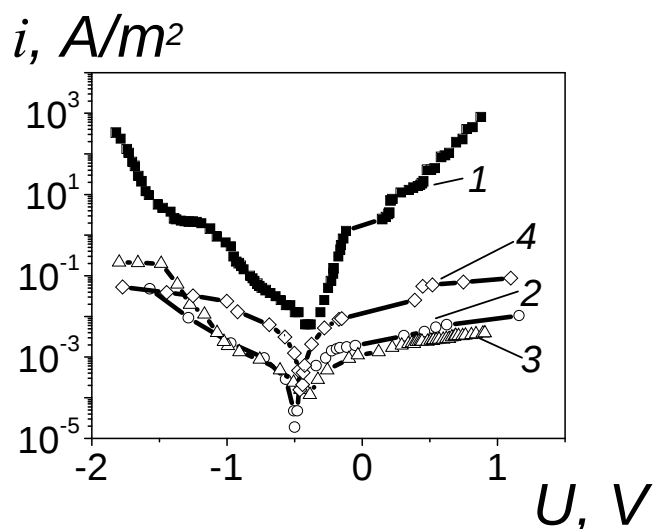


Fig. 4. Polarization curves: a – zirconium alloy (1) and its OCC (2, 3, 4) in a 10% HCl solution (modes are presents in Table 1)

Table 2

Corrosion potential and current of Zr - 2,5%Nb alloy and coating on it under different oxidation regimes

№	Corrosive environment	Electrolyte composition, g/l				I_a/I_c A/dm ²	τ , min	U_{cor} , B	i_{cor} , A/m ²
		KOH	l.g.	CrO ₃	H ₂ O ₂				
1	10%HCl	—	—	—	—	—	—	0,37	$8,07 \cdot 10^{-2}$
2		10	15	—	10	20/20	30	0,41	$0,21 \cdot 10^{-4}$
3		10	15	—	—	20/20	30	0,50	$1,39 \cdot 10^{-4}$
4		3	2	—	—	20/20	20	0,45	$12,07 \cdot 10^{-4}$

List of sources used.

1. Linlin Wang, Xin Hu, X. Nie. Deposition and properties of zirconia coatings on a zirconium alloy produced by pulsed DC plasma electrolytic oxidation. Surface and Coatings Technology, Vol. 221, 2013, P. 150-157. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.01.040>.
2. Sandhyarani M, Prasadrao T, Rameshbabu N. Role of electrolyte composition on structural, morphological and in-vitro biological properties of plasma electrolytic oxidation films formed on zirconium. Applied Surface Science, Vol. 317, 2014, P. 198-209, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.08.081>.
3. Shalabi MM, Gortemaker A, Hof MAV, Jansen JA, Creugers NHJ. Implant Surface Roughness and Bone Healing: a Systematic Review. Journal of Dental Research. 2006;85(6):496-500. [doi:10.1177/154405910608500603](https://doi.org/10.1177/154405910608500603)

© Н.Ю. Імбирович, Ю.В. Шишко, В.В. Ткачук, І.В. Боярська, Д.А. Гусачук

4. Kazem Babaei, Arash Fattah-alhosseini, Razieh Chaharmahali, A review on plasma electrolytic oxidation (PEO) of niobium: Mechanism, properties and applications, *Surfaces and Interfaces*, Vol. 21, 2020, 100719, <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100719>
5. Polo, T.O.B., Silva, W.P.P., Momesso, G.A.C. *et al.* Plasma Electrolytic Oxidation as a Feasible Surface Treatment for Biomedical Applications: an *in vivo* study. *Sci Rep* 10, 10000 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65289-2>
6. Tabares Ocampo J, Marín Valencia V, Robledo SM, Upegui Zapata YA, Restrepo Múnera LM, Echeverría F, Echeverry-Rendón M. Biological response of degradation products of PEO-modified magnesium on vascular tissue cells, hemocompatibility and its influence on the inflammatory response. *Biomater Adv.* 2023 Nov;154:213645. doi: 10.1016/j.bioadv.2023.213645. Epub 2023 Sep 30. PMID: 37806213.
7. Li, L.; Yang, E.; Yan, Z.; Xie, X.; Wei, W.; Li, W. Effect of Pre-Anodized Film on Micro-Arc Oxidation Process of 6063 Aluminum Alloy. *Materials* 2022, 15, 5221. <https://doi.org/10.3390/ma15155221>

Я.М. Пелех¹, О.П. Козарь², Т.В. Магеровська¹, С.М. Ментинський¹, Я.П. Легета²Національний університет «Львівська політехніка»¹ДВНЗ «Ужгородський національний університет»²**МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНОСТІ МАГНІТНОГО ПОЛЯ В ШАРІ
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОЇ СТАЛІ**

Робота присвячена визначенню періодичної складової напруженості магнітного поля в шарі електротехнічної сталі. Під час побудови математичної моделі магнітна проникність апроксимується дробово-раціональною функцією. Для розрахунку властивостей магнітного поля використано два нелінійні методи – метод четвертого порядку точності та метод третього порядку точності з двосторонньою оцінкою похибки результату. Переваги такого підходу полягають у тому, що використовуючи лише чотири обчислення правої частини диференціального рівняння отримано метод четвертого порядку точності, два двосторонні наближення третього порядку точності, а також явну оцінку головного члена локальної похибки результату. Проведено розрахунок і аналіз математичної моделі, а також визначено вигляд наближення магнітної проникності, яку потрібно використовувати при дослідженні слабких і сильних полів.

Ключові слова: рівняння електродинаміки, напруженість магнітного поля, задача Коші, нелінійний числовий метод, ланцюгові дробі, двосторонні наближення.

Ya.M. Pelekh, O.P. Kozar, T.V. Maherovska, S.M. Mentynsky, Ya.P. Legeta

**METHOD FOR DETERMINING THE MAGNETIC FIELD STRENGTH IN A SHEET OF
ELECTRICAL STEEL**

This work is devoted to the determination of the periodic component of the magnetic field strength in a layer of electrical steel. When constructing a mathematical model, the magnetic permeability is approximated by a fractional-rational function. To calculate the properties of the magnetic field, it is proposed to use two nonlinear methods - the method of the fourth order of accuracy and the third order of accuracy with a two-sided estimate of the error of the result.

The advantages of this approach are that using only four calculations of the right-hand side of the differential equation, a method of fourth-order accuracy, two two-sided approximations of third-order accuracy, and an explicit estimate of the main term of the local error of the result are obtained.

The mathematical model was calculated and analyzed, and the form of the magnetic permeability approximation that should be used in the study of weak and strong fields was determined.

Keywords: electrodynamic equations, magnetic field strength, initial value problem, continued fractions, two-sided approximations.

Постановка проблеми. Одним із пріоритетних напрямів сучасного машинобудування є підвищення ефективності технологічних процесів обробки конструкційних матеріалів при одночасному забезпеченні високих експлуатаційних характеристик деталей і вузлів. Особливе місце серед цих процесів займають методи індукційної термообробки, засновані на використанні електромагнітних полів. Порівняно з традиційними методами нагріву, вони забезпечують низку важливих переваг: локалізованість впливу, високу швидкість нагріву, можливість автоматизації процесу та зменшення енергетичних витрат. У результаті стає можливим отримання необхідного розподілу температурного поля в тілі деталі, формування оптимальної мікроструктури матеріалу та контроль залишкових механічних напружень, що визначають довговічність і надійність роботи конструкції.

У машинобудуванні широке застосування знаходять феромагнітні сталі, які є основою для виготовлення відповідальних елементів конструкцій. Однією з особливостей таких матеріалів є нелінійна залежність між індукцією магнітного поля та його напруженістю. Ця властивість значно ускладнює процес математичного моделювання явищ, які відбуваються при індукційному нагріві, оскільки опис електромагнітних і теплових процесів потребує використання нелінійних диференціальних рівнянь у частинних похідних. Аналітичні розв'язки для таких рівнянь можуть бути отримані лише для спрощених моделей, які не враховують реальних фізичних особливостей матеріалів.

У зв'язку з цим постає завдання створення адекватних математичних моделей, що враховують нелінійні магнітні властивості сталей та дозволяють із необхідною для практики точністю визначати розподіл напруженості магнітного поля в тілі деталі. Такий підхід відкриває можливість більш точного прогнозування процесів теплопровідності та формування напружено-деформованого стану, що безпосередньо впливає на якість і надійність оброблених деталей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемам моделювання електромагнітних процесів у феромагнітних матеріалах присвячено значну кількість досліджень. У класичних працях

© Я.М. Пелех, О.П. Козарь, Т.В. Магеровська, С.М. Ментинський, Я.П. Легета

розглянуто основні принципи індукційного нагріву та подано інженерні методики розрахунку процесів нагріву для різних класів матеріалів. Ці роботи заклали основу для подальшого розвитку теоретичних та прикладних досліджень у галузі. Аналіз літератури дозволяє зробити висновок, що актуальною задачею є поєднання точних апроксимацій магнітних характеристик сталей із ефективними числовими методами для розв'язання відповідних диференціальних рівнянь. Такий підхід дозволяє не тільки підвищити точність визначення напруженості магнітного поля, але й створює основу для побудови моделей, орієнтованих на потреби прикладної механіки та технології машинобудування.

Для розрахунку властивостей магнітного поля запропоновано методику, яка базується на представленні шуканого розв'язку диференціального рівняння в ланцюговий дріб [1]. Ланцюгові дроби можна розглядати як один з основних алгоритмів для знаходження апроксимацій Паде [2]. У роботах [3-8] з використанням різних нелінійних апроксимацій досліджуються конкретні прикладні задачі.

Переваги такого підходу полягають у тому, що, використовуючи на кожному кроці інтегрування лише чотири обчислення правої частини диференціального рівняння, отримано метод четвертого порядку точності та два двосторонні наближення третього порядку точності, а також знайдено явну оцінку головного члена локальної похибки результату. Запропонований нелінійний метод є вкладеним методом порядку точності 4(3) з двосторонньою оцінкою похибки.

Актуальність дослідження. Якість і відтворюваність формування заданих механічних властивостей деталей в процесі індукційної термообробки визначається точністю прогнозування розподілу напруженості магнітного поля у феромагнітному шарі, адже саме він зумовлює температурне поле, градієнти, а відтак – залишкові напруження та втомну довговічність. Запропонована в роботі математична модель, в якій магнітна проникність апроксимується дробово-раціональною функцією забезпечує високоточне відтворення періодичної складової напруженості магнітного поля. Це дозволяє оперативно досліджувати технологічні «вікна» процесу (перехід від поверхневого зміцнення до об'ємного нагріву, підбір частоти та сили струму індуктора), зменшити число натурних проб, підвищити енергоефективність і керованість режимів.

Метою дослідження є розроблення математичної моделі та числових методів для визначення періодичної складової напруженості магнітного поля у шарі електротехнічної сталі Е43, яка широко використовується в електротехнічних та машинобудівних конструкціях. Особливу увагу приділено можливості застосування результатів моделювання для оптимізації технологічних режимів індукційної термообробки, забезпечення раціонального розподілу температурних полів і контролю залишкових напружень у деталях машин.

Викладення основного матеріалу.

1. Математична модель.

Розглянемо задачу визначення періодичної складової напруженості магнітного поля в шарі електротехнічної сталі, на поверхні $z = 0$ якої підтримується напруженість

$$\overline{H}^{(0)} = \{0, H_0 \sin(2\pi \nu t), 0\},$$

де ν – частота, z – координата товщини, t – час.

Ми будемо виходити з рівнянь Максвелла [5], нехтуючи струмами зміщення. Тоді отримаємо рівняння

$$\sigma \mu(H) \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial^2 H}{\partial z^2}, \quad (1)$$

з граничними умовами

$$H(0, t) = H_0 \sin(2\pi \nu t), \quad H(l, t) = 0, \quad (2)$$

а також з умовою періодичності

$$H(z, t+T) = H(z, t). \quad (3)$$

Тут $\mu(H) = \frac{dB(H)}{dH}$, де $B = B(H)$ – індукція магнітного поля, σ – коефіцієнт електропровідності, $T = 1/\nu$ – період коливань електромагнітної хвилі, l – товщина шару.

Зауважимо, що залежності $B = B(H)$, або $\mu = \mu(H)$ є нелінійними. Для сталі Е43 вони показані на рис. 1 та рис. 2 суцільними лініями.

Розв'язуючи задачу (1)-(3), ми будемо апроксимувати залежність $\underline{\mu} = \underline{\mu}(H)$ дробово-раціональною функцією вигляду

$$\underline{\mu}(H) = \mu_0 \mu_{init} \frac{1 + A_1 H^2}{1 + A_2 H^2 + A_3 H^4}. \quad (4)$$

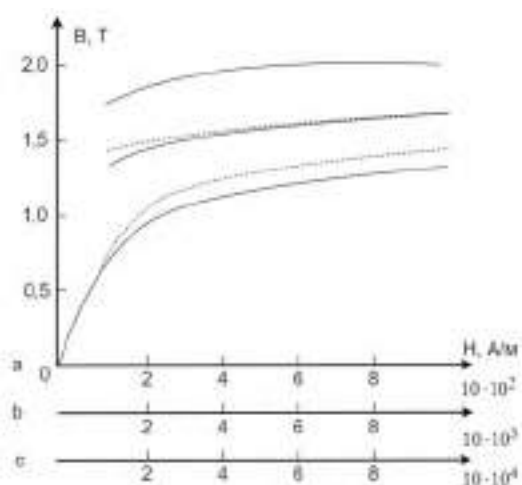


Рис. 1. Залежності індукції магнітного поля, що визначаються формулою (8) і експериментальними даними для сталі E43

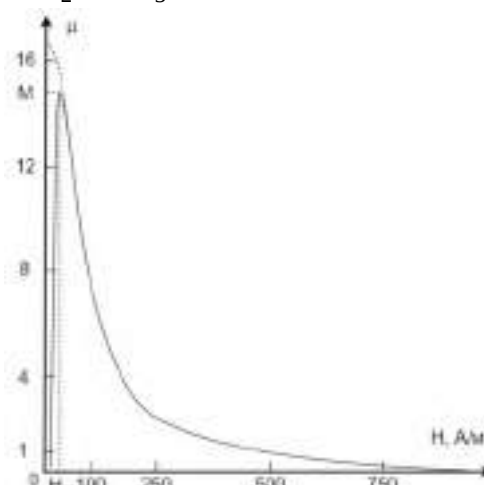


Рис. 2. Залежності напруженості магнітного поля, що визначаються формулою (7) і експериментальними даними для сталі E43

Константи A_i ($i = 1, 2, 3$) у співвідношенні (4) визначаються з умов:

$$\begin{aligned} \underline{\mu}(H_m) &= \mu_{\max} \mu_0, & \frac{d\underline{\mu}(H_m)}{dH} &= 0, \\ \underline{\mu} \frac{d^2 \underline{\mu}(H_m)}{dH^2} &< 0, & \lim_{H \rightarrow \infty} B(H) &= B_S, \end{aligned} \quad (5)$$

які відображають особливості експериментальних залежностей $\underline{\mu} = \underline{\mu}(H)$ та $B = B(H)$. Тут μ_0 – магнітна константа, μ_{init} та $\mu_{\max}$ – відповідно початкова та максимальна відносні магнітні проникності матеріалу, H_m – значення магнітного поля для максимальної магнітної проникності, B_S – індукція насичення.

При цьому отримаємо:

$$A_1 = \frac{\sqrt{K^2 - \alpha^2 G} - K}{\alpha^2}, \quad A_2 = \frac{\mu_{init} (A_1 H_m^2 + 2) - 2\mu_{\max}}{\mu_{\max} H_m^2}, \quad A_3 = \frac{\mu_{\max} - \mu_{init}}{\mu_{\max} H_m^4}, \quad (6)$$

де

$$\begin{aligned} K &= \alpha^2 \sqrt{A_3} - \frac{A_3}{2M}, & G &= A_3 (\alpha^2 - 2\sqrt{A_3} + 2H_m^2 A_3), \\ \alpha &= \frac{\pi \mu_0 \mu_{init}}{2B_S}, & M &= \frac{\mu_{\max}}{\mu_{init}}. \end{aligned}$$

Зауважимо, що у випадку великих значень напруженості магнітного поля, апроксимацію (4) можна записати як

$$\underline{\mu}(H) = \frac{\mu_0 \mu_{init}^*}{1 + AH^2}. \quad (7)$$

Для цього випадку залежність індукції магнітного поля від напруженості можна описати уточненою формулою Мюллера [5]:

$$B = \beta \arctan \sqrt{AH}, \quad (8)$$

і коефіцієнти апроксимації матимуть вигляд:

$$\beta = \mu_{init}^* \mu_0 \sqrt{A}, \quad A = \frac{A_3}{A_2}, \quad \mu_{init}^* = \frac{A_1}{A_2} \mu_{init}.$$

Графік функції $\underline{\mu}(H)$ що визначається формулою (7) для сталі Е43 наведено на рис. 2 штриховою лінією.

Перейдемо в задачі (1)-(3) до безрозмірних величин:

$$t = \omega \underline{t}, \quad z = \frac{z}{l}, \quad u = \frac{H}{H_0},$$

$$b = \frac{B}{\mu_0 \mu_{init} H_0}, \quad \mu(u) = \frac{\underline{\mu}(H)}{\mu_0 \mu_{init}}.$$

Тоді вихідне рівняння (1) набуває вигляду

$$2\gamma^2 \mu(u) \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}, \quad (9)$$

де

$$\mu(u) = \begin{cases} \frac{1 + a_1 \varepsilon u^2}{1 + a_2 \varepsilon u^2 + a_4 \varepsilon^2 u^4}, & \text{для співвідношення (4)} \\ \frac{a_1}{a_2 + a_3 \varepsilon u^2}, & \text{для співвідношення (7)} \end{cases} \quad (10)$$

Граничні умови та умова періодичності мають вигляд

$$u(0, t) = \sin(t), \quad u(1, \underline{t}) = 0, \quad (11)$$

$$u(z, \underline{t} + 2\pi) = u(z, \underline{t}). \quad (12)$$

Тут

$$a_1 = \frac{A_1}{\alpha^2}, \quad a_2 = \frac{A_2}{\alpha^2}, \quad a_3 = \frac{A_3}{\alpha^4},$$

$$\varepsilon = (\alpha H_0)^2, \quad \gamma^2 = \pi \sigma \mu_{init} \mu_0 \nu l^2. \quad (13)$$

Після дискретизації відносно просторової змінної, задача (9), (10), (11) зводиться до системи звичайних диференціальних рівнянь:

$$\frac{du_i(t)}{dt} = \begin{cases} \frac{1 + a_2 \varepsilon u_i^2(t) + a_3 \varepsilon^2 u_i^4(t)}{1 + a_1 \varepsilon u_i^2(t)} \cdot \frac{u_{i+1}(t) - 2u_i(t) + u_{i-1}(t)}{2\gamma^2 \bar{h}^2}, & \text{для (4)} \\ \frac{a_2 + a_3 \varepsilon u_i^2(t)}{a_1} \cdot \frac{u_{i+1}(t) - 2u_i(t) + u_{i-1}(t)}{2\gamma^2 \bar{h}^2}, & \text{для (7)} \end{cases} \quad (14)$$

з початковою умовою

$$u_0(t) = \sin(t), \quad u_i(0) = 0, \quad i = \overline{1, n-1}, \quad u_N(t) = 0, \quad (15)$$

де $\bar{h} = \frac{1}{N}$, N – число точок розбиття відрізка $[0, 1]$.

2. Методика розв'язання задачі електродинаміки.

Спочатку представимо задачу (14)-(15) у більш загальному випадку, а саме у вигляді задачі Коші для системи звичайних диференціальних рівнянь:

$$y' = f(x, y), \quad y(x_0) = y_0, \quad x \in [x_0, x_0 + L], \quad (16)$$

де $y(x)$ – дійсний m – компонентний вектор, f – дійсна векторна функція залежної та незалежної змінних, причому припускається, що функція f володіє необхідною для викладок гладкістю.

Нелінійні двосторонні [9, 11, 12] числові алгоритми розв'язування задачі Коші для звичайних диференціальних рівнянь (16) будуються так, щоб локальна похибка схеми в кожній вузловій точці мала вигляд:

$$y(x_{n+1}) - y_{n+1} = \omega h^p KF(f) + O(h^{p+1}), \quad (17)$$

де $y(x_{n+1})$ і y_{n+1} – відповідно точний і наближений розв'язок задачі (16), h - крок інтегрування, $F(f)$ – деякий диференціальний оператор, обчислений в точці (x_n, y_n) , K – константа, p – порядок точності методу, ω – параметр двосторонності.

Для зменшення громіздкості записів, наводимо алгоритм знаходження наближеного розв'язку задачі Коші (16) у скалярному випадку, оскільки на системи диференціальних рівнянь відповідні розрахункові формули переносяться покомпонентно.

Згідно з теорією побудови однокрокових методів [12,13], числовий розв'язок задачі (16) представимо у вигляді С-дробу [1, 9]:

$$y_{n+1}^{[k,l]} = \frac{y_n}{D_n}, \quad (18)$$

де

$$D_n = \sum_{i=0}^{k-1} d_{i,0} + \frac{d_{k,0}}{1 + \frac{d_{k,1}}{1 + \dots + \frac{d_{k,l-1}}{1 + d_{k,l}}}}.$$

Вирази для $d_{k,l}$ у випадку $k+l = \overline{1,4}$ ($k = \overline{1,4}$; $l = \overline{0,3}$) мають вигляд:

$$\begin{aligned} d_{0,0} &= 1, \quad d_{i,0} = - \sum_{m=1}^i d_{i-m,0} \cdot \frac{\sigma_m}{y_n}, \quad i = \overline{1,4}, \\ d_{v,1} &= - \frac{d_{v+1,0}}{d_{v,0}}, \quad v = \overline{1,3}, \quad d_{\mu,2} = d_{\mu+1,1} - d_{\mu,1}, \quad \mu = \overline{1,2} \\ d_{1,3} &= d_{1,2} \frac{d_{2,2}}{d_{1,2}}, \quad \sigma_m = h \sum_{i=1}^q a_{mi} k_i, \quad q = k+l, \\ k_i &= f(x_n + \alpha_i h, y_n + h \sum_{j=1}^q \beta_{ij} k_j), \quad \alpha_i = \sum_{j=1}^q \beta_{ij}, \quad y_n \neq 0. \end{aligned} \quad (19)$$

Тут h - крок інтегрування ($h = x_{n+1} - x_n$, $n = \overline{0,1,\dots}$), a_{ij} , α_i , β_{ij} ($i, j = \overline{1,4}$) – параметри.

Ці формули дозволяють будувати як явні ($\beta_{ij} = 0$, при $i \leq j$), так і неявні числові методи.

Значення параметрів a_{ij} , α_i , β_{ij} зручно записувати у вигляді таблиці:

α_1	β_{11}	$\dots$	β_{1v}	a_{11}	$\dots$	a_{1v}
$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$
α_v	β_{v1}	$\dots$	β_{vv}	a_{v1}	$\dots$	a_{vv}

При значеннях k і l ($k = \overline{1,4}$; $l = \overline{0,3}$) отримано розрахункові формули різного порядку точності p ($p = \overline{1,4}$). Розвинувши в ряд Тейлора по степенях h розв'язок задачі (16) і її наближений розв'язок (6), а також взявши їх різницю і прирівнявши до нуля відповідні коефіцієнти при степенях h^i ($i = \overline{1,4}$), отримаємо умови, яким повинні задовольняти параметри a_{ij} , α_i , β_{ij} ($i, j = \overline{1,4}$), щоб

$$y(x_{n+1}) - y_{n+1}^{[k,l]} = O(h^5).$$

Проілюструємо побудову числового методу при $k=4$ і $l=0$. В результаті отримаємо наступну систему рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} (a_{22} + a_{32} + a_{42})\alpha_2 + (a_{33} + a_{43})\alpha_3 + (a_{34} + a_{44})\alpha_4 = \frac{1}{2} \\ (a_{22} + a_{32} + a_{42})\frac{\alpha_2^2}{2} + (a_{33} + a_{43})\frac{\alpha_3^2}{2} + (a_{34} + a_{44})\frac{\alpha_4^2}{2} = \frac{1}{6} \\ (a_{22} + a_{32} + a_{42})\frac{\alpha_2^3}{6} + (a_{33} + a_{43})\frac{\alpha_3^3}{6} + (a_{34} + a_{44})\frac{\alpha_4^3}{6} = \frac{1}{24} \\ (a_{33} + a_{43})\beta_{32}\alpha_2 + (a_{34} + a_{44})(\beta_{42}\alpha_2 + \beta_{43}\alpha_3) = \frac{1}{6} \\ (a_{33} + a_{43})\beta_{32}\alpha_2^2 + (a_{34} + a_{44})(\beta_{42}\alpha_2^2 + \beta_{43}\alpha_3^2) = \frac{1}{12} \\ (a_{33} + a_{43})\alpha_3\beta_{32}\alpha_2 + (a_{34} + a_{44})(\beta_{42}\alpha_2 + \beta_{43}\alpha_3) = \frac{3}{24} \\ (a_{34} + a_{44})\beta_{43}\beta_{32}\alpha_2 = \frac{1}{24} \\ \sum_{i=1}^4 a_{4i} = 0, \sum_{i=2}^4 a_{4i}\alpha_i = 0, \sum_{i=2}^4 a_{4i}\frac{\alpha_i^2}{2} = 0, \\ a_{43}\beta_{32}\alpha_2 + a_{44}(\beta_{42}\alpha_2 + \beta_{43}\alpha_3) = 0, \\ \sum_{i=1}^4 a_{3i} = 0, \sum_{i=2}^4 a_{3i}\alpha_i = 0 \\ (a_{22} + a_{32})\frac{\alpha_2^2}{2} + a_{33}\frac{\alpha_3^2}{2} + a_{34}\frac{\alpha_4^2}{2} = \frac{1}{6} \\ a_{33}\beta_{32}\alpha_2 + a_{34}(\beta_{42}\alpha_2 + \beta_{43}\alpha_3) = \frac{1}{6} \\ a_{21} + a_{22} = 0, \quad a_{22}\alpha_2 = \frac{1}{2}, \quad \alpha_i = \sum_{j=1}^{i-1} \beta_{ij}. \end{array} \right. \quad (20)$$

Наведемо один набір коефіцієнтів розв'язку системи (20). Поклавши $\alpha_2 = \alpha_3$; отримаємо:

$$\begin{aligned} \alpha_2 = \alpha_3 = 1/2; \quad \alpha_4 = 1; \quad \beta_{21} = \frac{1}{2}; \quad \beta_{31} = \frac{(\beta_{43}-1)}{2\beta_{43}}; \\ \beta_{32} = \frac{1}{2\beta_{43}}; \quad \beta_{41} = 0; \quad \beta_{42} = 1 - \beta_{43}; \\ a_{11} = 1; \quad a_{21} = -1; \quad a_{22} = 1; \quad a_{31} = 1/6; \\ a_{32} = -\frac{(1+\beta_{43})}{3}; \quad a_{33} = \frac{\beta_{43}}{3}; \quad a_{34} = \frac{1}{6}; \\ (a_{1j} = 0, j = 2, 3, 4; \quad a_{23} = a_{24} = 0; \quad a_{4i} = 0, i = \overline{1, 4}); \quad \beta_{ij} = 0 \text{ при } i \leq j; \end{aligned} \quad (21)$$

де β_{43} ($\beta_{43} \neq 0$) – параметр.

Якщо у співвідношеннях (20) покласти

$$a_{42} \frac{\alpha_2^2}{2} + a_{43} \frac{\alpha_3^2}{2} + a_{44} \frac{\alpha_4^2}{2} = -\frac{\omega_1}{2},$$

$$a_{42}\beta_{32}\alpha_2 + a_{44}(\beta_{42}\alpha_2 + \beta_{43}\alpha_3) = -\frac{\omega_2}{2},$$

то

$$y(x_{n+1}) - y_{n+1}^{[4,0]} = h^4 \{ \omega_1 F_1(f) + \omega_2 F_2(f) \} + O(h^5).$$

Наведемо значення параметрів для двосторонніх формул при $\alpha_2 = \alpha_3$:

$$\begin{aligned} \alpha_2 = \alpha_3 = \frac{1}{2}, \quad \beta_{21} = \frac{1}{2}, \quad \beta_{31} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2\beta_{43}}, \quad \beta_{32} = \frac{1}{2\beta_{43}}, \\ \alpha_4 = 1, \quad \beta_{41} = 0, \quad \beta_{42} = 1 - \beta_{43}, \\ a_{11} = 1, \quad a_{12} = a_{13} = a_{14} = 0, \quad a_{21} = -1, \quad a_{22} = 1, \quad a_{23} = a_{24} = 0, \\ a_{31} = \frac{1}{6} + 2\omega_1, \quad a_{32} = 4\omega_1(\beta_{43} - 1) - 2\omega_2\beta_{43} - \frac{1}{3}(1 + \beta_{43}), \\ a_{33} = \frac{1}{3}\beta_{43} + 2\beta_{43}(\omega_2 - 2\omega_1), \quad a_{34} = \frac{1}{6} + 2\omega_1, \quad a_{41} = -2\omega_1, \\ a_{42} = 4\omega_1(1 - \beta_{43}) + 2\omega_2\beta_{43}, \quad a_{43} = 2\beta_{43}(2\omega_1 - \omega_2), \quad a_{44} = -2\omega_1, \end{aligned} \quad (22)$$

де β_{43} – відмінний від нуля параметр.

Поклавши $\omega_1 = \omega_2 = \omega$, отримаємо наступну множину параметрів:

0	0	0	0	1	0	0	0
1/2	1/2	0	0	-1	1	0	0
1/2	0	1/2	0	1/6 + 2ω	-2ω - 2/3	1/3 - 2ω	1/6 + 2ω
1	0	0	1	-2ω	2ω	2ω	-2ω

При цьому

$$y(x_{n+1}) - y_{n+1} = \omega h^4 (D^2 f + f_y \cdot Df) + O(h^5) \cong h \sum_{i=1}^4 \tilde{a}_{4i} k_i. \quad (23)$$

Зауваження 1. Якщо покласти $\omega = 0$, то отримуємо набір коефіцієнтів для методу четвертого порядку точності.

Зауваження 2. Запропоновані розрахункові формули, використовуючи лише чотири звертання до правої частини диференціального рівняння, дозволяють отримувати не тільки односторонній метод четвертого порядку точності, але і двосторонні розрахункові формули третього порядку точності з оцінкою головного члена локальної похибки. Для порівняння, відповідні двосторонні лінійні методи Рунге-Кутта третього порядку точності використовують не менше 6 звертань до правої частини диференціального рівняння [13].

3. Аналіз розв'язків.

Розрахунки напруженості магнітного поля були проведені для електротехнічної сталі Е43, характеристики якої такі:

$$\mu_{\max} = 9000, \quad B_S = 2,07, \quad H_m = 30.$$

Тоді згідно з (13) $a_1 = 713610$, $a_2 = 41238,18$, $a_3 = 10752490$. Для знайдених a_1, a_2, a_3 функція $B = B(H)$, яка відповідає залежності $\mu = \mu(H)$ згідно з формули (4), показана на рис. 1 штриховою лінією. З рис. 1 видно, що запропонована апроксимація функції $\mu = \mu(H)$ з достатньою для практики точністю апроксимує залежність $B = B(H)$ для сталі Е43.

Розв'язавши задачу Коші для системи звичайних диференціальних рівнянь (14)-(15) запропонованим двостороннім методом, був проведений гармонічний аналіз. Наведемо результати дослідження розподілу амплітуд напруженості магнітного поля по товщині шару для обраних наближень (4) та (7) для $\gamma = 6$.

На рис. 3 та рис. 4 суцільними лініями показано (у випадку залежності (4)) розподіл амплітуди першої гармоніки напруженості магнітного поля відповідно для $\varepsilon = 0; 0,0001; 0,001; 0,01; 0,1$ та $\varepsilon = 0,2; 1; 10; 100; 1000$. Як видно з рисунків, при зміні ε від 0 до 0,2 розподіл поля має приповерхневий характер, а найбільший – при $\varepsilon = 0,2$. Для $\varepsilon > 0,2$ ступінь ослаблення магнітного поля зменшується, тобто розподіл стає більш лінійним.

Графіки розподілу амплітуд третьої гармоніки напруженості магнітного поля для $\varepsilon = 0; 0,0001; 0,001; 0,01; 0,1$ та $\varepsilon = 0,2; 1; 10; 100; 1000$ показані суцільними лініями на рис. 5 та рис. 6 відповідно.

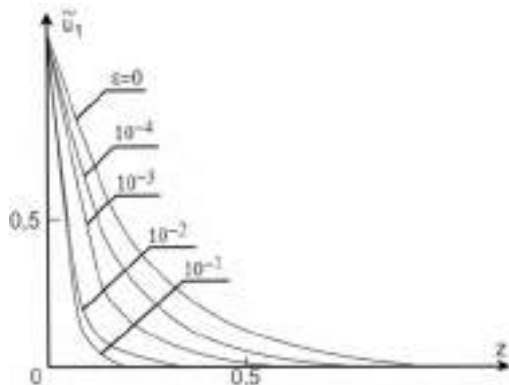


Рис. 3. Розподіл амплітуди першої гармоніки напруженості магнітного поля при $\varepsilon = 0; 10^{-4}; 10^{-3}; 10^{-2}; 10^{-1}$.

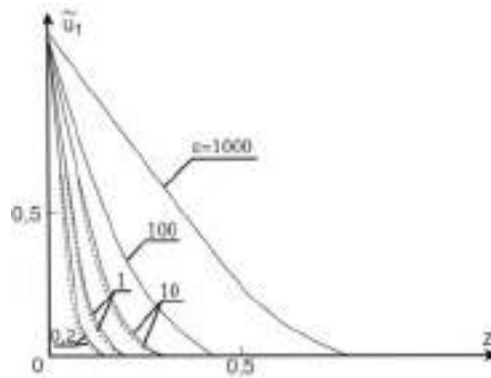


Рис. 4. Розподіл амплітуди першої гармоніки напруженості магнітного поля при $\varepsilon = 0,2; 1; 10; 10^2; 10^3$.

На рис. 4 і рис. 6 для порівняння штриховими лініями показані розподіли амплітуд першої та третьої гармоніки напруженості магнітного поля, знайдених із залежності (7) для $\varepsilon = 0,2; 1; 10; 100; 1000$. При $\varepsilon = 100$ і $\varepsilon = 1000$ ці графіки співпадають.

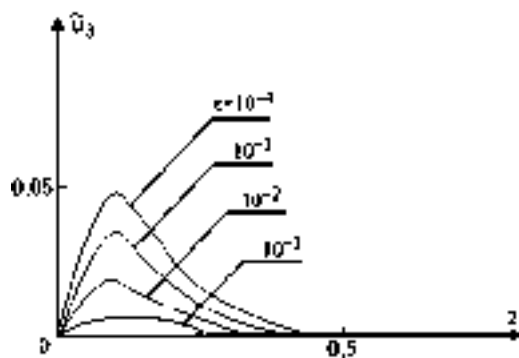


Рис. 5. Розподіл амплітуди третьої гармоніки напруженості магнітного поля при $\varepsilon = 0; 10^{-4}; 10^{-3}; 10^{-2}; 10^{-1}$.

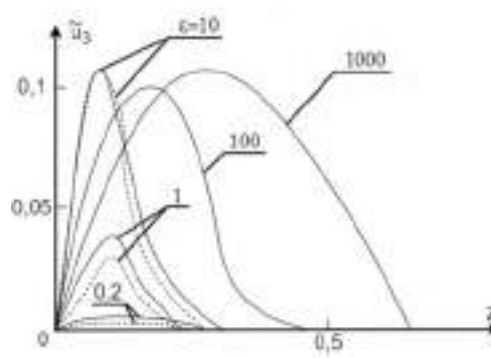


Рис. 6. Розподіл амплітуди третьої гармоніки напруженості магнітного поля при $\varepsilon = 0,2; 1; 10; 10^2; 10^3$.

З аналізу результатів видно, що різниця між розв'язками рівняння (9) при різних $\underline{\mu}$, визначених з (10), зменшується зі збільшенням ε . Так, для $\varepsilon > 0,1$ вона стає менше 3%, а для $\varepsilon > 100$ – менше 1%. Це означає, що при визначенні електромагнітного поля у феромагнітних тілах для слабких полів необхідно використовувати наближення $\underline{\mu} = \underline{\mu}(H)$, яке визначається формулою (4). У випадку сильних полів потрібно використовувати формулу (7).

Висновки. Побудовано математичну модель для визначення періодичної складової напруженості магнітного поля в шарі електротехнічної сталі. Для дослідження побудованої моделі використано нелінійний метод четвертого порядку точності та двосторонні наближення третього

порядку точності з оцінкою головного члена локальної похибки результату. Запропонований метод є вкладеним [14, 15, 16] методом порядку точності 4(3) з двосторонньою оцінкою похибки в кожній точці інтегрування. Запропоновані розрахункові формули дозволяють на кожному кроці інтегрування зменшити кількість звернень до правої частини рівняння на 25% порівняно з класичними двосторонніми методами Рунге-Кутти [13].

Із аналізу отриманих результатів слідує, що при визначенні електромагнітного поля у феромагнітних тілах для слабких полів необхідно використовувати наближення $\underline{\mu} = \underline{\mu}(H)$, яке визначається формулою (4). У випадку сильних полів потрібно використовувати формулу (7).

Результати, що випливають з дослідження математичної моделі розподілу електромагнітних полів можна використовувати для побудови раціональних режимів обробки феромагнітних елементів конструкцій типу пластин, а також при аналізі та синтезі мікроелектромеханічних систем на етапі проектування [8].

Список використаних джерел:

1. Jones W. B., Thron W. J., & Waadeland H. (1982). Analytic theory of continued fractions Lecture Notes in Mathematics, Vol. 932. Springer-Verlag.
2. Baker G. A. & Graves-Morris P. (1996). Padé approximants (2nd ed.). Cambridge University Press.
3. Butusov D., Karimov A, Tutueva A, Kaplun D & Nepomuceno E. (2019) The Effects of Padé numerical integration in simulation of conservative chaotic systems, Entropy, 21(4), pp. 362-369.
4. Hofreither C. A. (2019) Unified view of some numerical methods for fractional diffusion. RICAM. Austrian Academy of sciences. Report № 12, 21 p.
5. Pelekh Ya., Mentynskyi S., Stolyarchuk R, Fil B. & Kunynets A. (2020) Modelling and Methods for Calculating of Electromagnetic Field in a Conducting Ferromagnetic Layer. 15th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies, CSIT-2020. Proceeding, 1, pp. 150-154.
6. Пелех Я. М., Кунинець А. В., Ментинський С. М., Філь Б. М. (2021) Моделювання нестационарних процесів дифузії водню поблизу вершини тріщини в полі неоднорідних механічних напружень // Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології : науковий збірник. № 33. – С. 93–98.
7. Ігнатишин М. І., Пелех Я. М., Глинський Я. М., Пахолок Б. Б. (2021) Моделювання та анімація пружинного гасника коливань // Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології: науковий збірник. – № 32. – С. 131–135.
8. Auzinger W., Stolyarchuk R., Pelekh Y., Kozar O., Mentynskyi S., Ihnatyshyn M. (2020). The Studying of Hydrogen Diffusion Non-Stationary Processes Near a Crack in the Field of Heterogeneous Mechanical Tensions for the Encapsulated MEMS Devices. International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design, (MEMSTECH-2020), pp. 164-168.
9. Пелех Я.М., Будз І.С., Кунинець А.В., Ментинський С.М., Філь Б.М. (2019) Методи розв'язування початкової задачі з двосторонньою оцінкою локальної похибки. Науковий вісник НЛТУ України. – Т. 29, № 9. – С. 153-160.
10. Gybkina, N, Sidorov, M., Vasylyshyn K. (2021). Application of two-sided approximations method to solution of first boundary value problem for one-dimensional nonlinear heat conductivity equation. Системні дослідження та інформаційні технології. – № 4. – С. 115-127.
11. Пелех Я. М., Кунинець А. В., Пелех Р. Я. (2022) Двосторонні методи розв'язування початкової задачі для нелінійних інтегро-диференціальних рівнянь // Журнал обчислювальної та прикладної математики, № 2. – С. 116–121.
12. Butcher J. C. (2016) Numerical methods for ordinary differential equations. London: John Wiley & Sons.
13. Ляшко І.І., Макаров В.Л., Скоробогатько А.А. (1977) Методы вычислений. Киев: Вища школа.
14. Bogacki P., Shampine L. F. (1989) A 3(2) pair of Runge-Kutta formulas. Appl. Math. Let. – 2(4), pp. 321–325.
15. Пелех Я. М., Кунинець А. В., Пахолок Б. Б. (2023) Вкладені методи з двосторонньою оцінкою локальної похибки для розв'язування нелінійних інтегро-диференціальних рівнянь // Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології : науковий збірник. – Вип. 37. – С. 62-66.
16. Пелех Я. М., Кунинець А. В., Ментинський С. М. (2023) Числові методи розв'язування початкової задачі для нелінійних інтегро-диференціальних рівнянь // Вісник Львівського університету. Серія: Прикладна математика та інформатика. – Вип. 31. – С. 64–74.

Рецензент Рубіш Василь Михайлович, доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач Ужгородської лабораторії матеріалів оптоелектроніки та фотоніки Інституту проблем реєстрації інформації НАН України.

Н.О.Олійник¹, Г.Д.Ільницька¹, Г.А.Петасюк¹, О.М.Сизоненко², В.Д.Рудь³,
Г.А.Базалій¹, С.Д. Заболотний¹, М.М.Циба⁴

Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України¹

Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України²

Луцький національний технічний університет³

Інститут сорбції та проблем ендоекології⁴

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ОДЕРЖАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНО ОРІЄНТОВАНИХ ПОРОШКІВ СИНТЕТИЧНОГО АЛМАЗУ

Експериментальними дослідженнями порошку синтетичного алмазу марки AC20 зернистості 100/80 показано, що вплив способів модифікування вихідного порошку (модифікування високовольтними електричними розрядами або рідиннофазним окисленням) відображається на зміні адсорбційно-структурних та морфометричних характеристик порошків: зокрема питомої площі поверхні; питомого об'єму пор; середнього радіуса пор; сумарного об'єму пор, розподілу об'єму пор за їх розміром. Показник питомої площі поверхні вихідних зразків має тенденцію до зниження після модифікування порошків. Досліджені зразки мають розвинену мезопористу структуру поверхні. Досліджені способи модифікування не виявляють суттєвого впливу на морфометричні характеристики порошків. Порівняльний аналіз результатів за коефіцієнтами лінійної апроксимації кривих розподілу пор за розміром дає змогу отримати на кількісному рівні показник (a_2/a_1) зміни стану поверхні порошків, що може слугувати характеристикою якості поверхні порошку при вивченні дефектності поверхні зерен синтетичного алмазу та її впливу на експлуатаційні характеристики алмазного інструменту. Отримані результати дають підґрунтя для подальшого розроблення бази даних формування оптимальних показників адсорбційно-структурних характеристик порошків синтетичного алмазу широкого функціонального призначення.

Ключові слова: порошок синтетичного алмазу, адсорбційно-структурні характеристики, морфометричні характеристики

N.O. Oliinyk, H.D. Ilnytska, G.A. Petasyuk, O.N. Sizonenko, V.D. Rud,
G. A. Bazaliy, S. D. Zabolotnyi, M.M. Tsyba

EXPERIMENTAL STUDIES ON THE PREPARATION OF FUNCTIONALLY ORIENTED SYNTHETIC DIAMOND POWDER

Experimental studies of synthetic diamond powder of the AC20 grade with a grain size of 100/80 have shown that the influence of the methods of modifying the original powder (modification by high-voltage electric discharges or liquid-phase oxidation) is reflected in the change in the adsorption-structural and morphometric characteristics of the powders: in particular, the specific surface area; specific pore volume; average pore radius; total pore volume, and the distribution of pore volume by their sizes. The specific surface area of the original samples tends to decrease after the modification of the powders. The studied samples have a developed mesoporous surface structure. The studied modification methods do not show a significant effect on the morphometric characteristics of the powders. Comparative analysis of the results by the coefficients of linear approximation of the pore size distribution curves allows us to obtain at the quantitative level the indicator (a_2/a_1) of the change in the state of the powder surface, which can serve as a characteristic of the quality of the powder surface when studying the defectivity of the surface of synthetic diamond grains and its influence on the operational characteristics of the diamond tool. The results obtained provide a basis for further development of a database for the formation of optimal indicators of the adsorption-structural characteristics of synthetic diamond powders of wide functional purpose.

Keywords: synthetic diamond powder, adsorption-structural characteristics, morphometric characteristics

Functional synthetic diamond powders are used in various industries. The properties of the powder are formed in the process of synthesis, extraction, sorting and modification, which determines the formation of powder properties, including the characteristics of the surface of its grains. The effectiveness of the use of powders largely depends on the adsorption-structural characteristics of the surface [1]. In well-known publications, the influence of methods for modifying synthetic diamond powders on changing their physico-mechanical and physico-chemical properties of diamond powder, morphology and chemical composition of the surface, adsorption-structural characteristics of the powder [1-4] has been studied.

The creation of new methods for modifying diamond powders is relevant and has important applied value. For the effective manufacture and operation of abrasive tools, it is necessary to study the state of the surface of diamond powder according to adsorption-structural characteristics: specific surface area, pore distribution (micro- and mesopores) by size and pore volume [1].

Another important aspect for the effective manufacture and operation of abrasive tools is also the study of the morphometric characteristics of modified powders.

© Н.О.Олійник, Г.Д.Ільницька, Г.А.Петасюк, О.М.Сизоненко, В.Д.Рудь, Г.А.Базалій, С.Д.
Заболотний, М.М.Циба

The purpose of this study. The purpose of this study is to study at a quantitative level the influence of methods of modifying the original powder on the change in adsorption-structural and morphometric characteristics.

Methodology. Samples of diamond powder of the AC20 grade with a grain size of 100/80, synthesized in the Ni-Mn-C system, were studied. Two methods were used to modify the powder: a method of chemical modification using liquid-phase oxidation and a method of pulsed processing by high-voltage electric discharges in an aqueous medium (HVED). HVED modification was carried out on an experimental stand in distilled water with a pressure of 800 MPa and a total processing energy of 1000 kJ in the discharge channel.

Adsorption-structural characteristics were determined using a NOVA 2200 gas adsorption analyzer (Quantachrome, USA). The isotherm was determined by the method of low-temperature nitrogen adsorption-desorption (77 K) at $p/p_s = 0.99$, which was used to determine the specific area (S_{BET} , m^2/g) in the region of the monolayer of nitrogen surface coverage; The specific pore volume V_p (cm^3/g), average pore radius R_p (nm), adsorption energy (J/m^2), volume and radius of mesopores; total pore and mesopore volumes, and size distribution of pores and mesopores were determined by the DFT method.

The free energy of saturation of the powder surface with water vapor, which characterizes the degree of hydrophilicity ($mJ/g \cdot mol$, ΔC_s) was determined by the method developed at the V.M. Bakul Institute of Materials Science and Engineering of the National Academy of Sciences of Ukraine.

The surface topography was determined using scanning microscopy methods; morphometric characteristics (compactness (form factor, Cr) and roughness (Rg) of grain projection; the number of cutting edges (n , pcs.) and the average value of their sharpening angles (φ , degrees) were determined by indirect analytical method - using the DiaInspect.OSM device from Vollstaedt Diamant GmbH to obtain the necessary initial data.

A comparative analysis was carried out based on the results of linear approximation of the pore size distribution curves. The results of the study are presented in Tables 1-4

Table 1

Adsorption and structural characteristics of the initial AC20 diamond powder with a grain size of 100/80 and powder samples after modification

Characteristic name	Sanding powder brand AC20, grain size 100/80		
	Methods of powder modification		
	Diamond powder (DSTU 3292-95)	Chemical modification	Application of HVED modification
Specific surface area, S_{BET} , m^2/g	0,5422	0,2542	0,4151
Adsorption energy, kJ/mol	7,544	8,446	0,6499
Specific pore volume, $V \cdot 10^{-3}$, cm^3/g	1,234	0,8682	3,131
Average pore radius, nm	4,551	6,831	8,288
energy of saturation of the powder surface with water vapor (hydrophilicity) $mJ/g \cdot mol$, ΔC_s	264,9	187,1	119,3

According to the results of the experimental study using the HVED method, it was found that, compared with the indicators of the original powder, chemical modification using liquid-phase oxidation leads to a decrease in the specific surface area by 53%; the free energy of saturation of the powder surface with water vapor by 29.2%; the specific pore volume by 23.9%; to an increase in the adsorption energy by 11.9% and the average pore radius by 50.1%.

The use of the HVED modification method leads to a decrease in the specific surface area by 23.4%; the specific pore volume by 47.3%; the average pore radius by 31.1%; to an increase in the adsorption energy by 9.9%; to a decrease in the free energy of saturation of the powder surface with water vapor by 55.0%.

According to the results of the experimental study using the BET method, it was found that, compared with the indicators of the original powder, chemical modification using liquid-phase oxidation leads to a decrease in the specific surface area by 53%; the free energy of saturation of the powder surface with water vapor by 29.2%; The morphometric characteristics of the original AC20 diamond powder with a grain size of 100/80 and the powder samples after modification do not differ significantly. HVED modification leads

© Н.О.Олійник, Г.Д.Ільницька, Г.А.Петасюк, О.М.Сизоненко, В.Д.Рудь, Г.А.Базалій, С.Д. Заболотний, М.М.Ціба

to an increase in the number of cutting edges and the average value of the sharpening angles of the cutting edges.

Table 2

Morphometric characteristics of the initial AC20 diamond powder with a grain size of 100/80 and powder samples after modification

Characteristic name		Sanding powder brand AC20, grain size 100/80		
		Methods of powder modification		
		Diamond powder (DSTU 3292-95)	Chemical modification	Application of HVED modification
Compactness (form factor), Cr	Average value	1,304	1,3042	1,305
	Uniformity	0,7107	0,6979	0,6985
Grain projection roughness, Rg	Average value	1,0602	1,06001	1,06503
	Uniformity	0,7402	0,7429	0,7435
Number of cutting edge sharpenings, n		10	10	11
Average value of cutting edge sharpening angles, φ		106,37	106,32	107,32

According to the classification officially adopted by the International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC), pores with sizes (diameters) less than 2 nm are micropores, 2-50 nm are mesopores, and more than 50 nm are macropores.

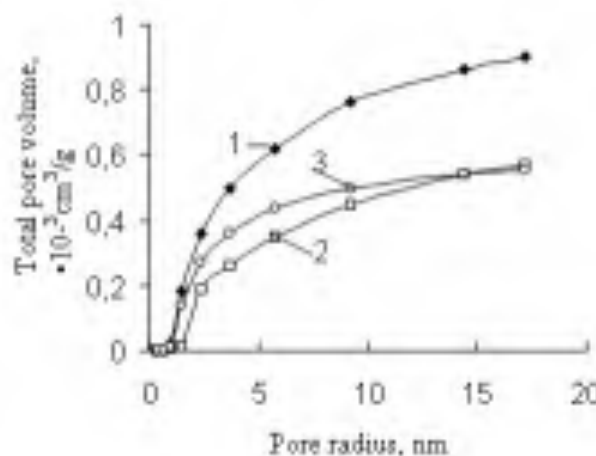


Fig. 1 Pore size distribution, determined by pore volume using the DFT method, of synthetic diamond grinding powder of the AC20 brand with a grain size of 100/80: initial powder (1), powder after chemical modification (2) and modification by HVED treatment (3)

According to the results of the experimental study using the BET method, it was found that, compared with the indicators of the original powder, chemical modification using liquid-phase oxidation leads to a decrease in the specific surface area by 53%; the free energy of saturation of the powder surface with water vapor by 29.2%; Fig. 1 shows the distribution of the pore radius (the calculated values of the pore radius, nm) by the value of the total pore volume. As can be seen from Fig. 1, all the studied samples have a developed mesoporous surface structure. The indicators of the pore distribution by size of the original powder Fig. 1 (curve 1), after chemical modification (curve 2) and after VER modification differ.

Table 3 presents the adsorption-structural characteristics (average pore radius, total pore volume and mesopore volume, total pore volume radius interval and mesopore volume radius interval) of synthetic diamond grinding powder samples, initial and after modification.

The range of pore size distribution in all three samples of grinding powders, the original and those obtained after modification, is almost the same and is (0.3-17.2) nm.

The average pore radius of the grinding powder of the AC20 100/80 brand after chemical modification increases to 1.55 nm from 1.42 nm (original sample). At the same time, the total pore volume

© Н.О.Олійник, Г.Д.Ільницька, Г.А.Петасюк, О.М.Сизоненко, В.Д.Рудь, Г.А.Базалій, С.Д. Заболотний, М.М.Ціба

decreases to $0.57 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{g}$ relative to the value of the pore volume of the original sample of $0.90 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{g}$.

Table 3

Adsorption and structural characteristics of samples of ground and micropowders of synthetic diamond, initial and after modification

Diamond powder (DSTU 3292-95)	Modification method	Sample №	Average pore radius (DFT method), nm	Pore volume, pore size range (DFT method)			
				Total pore volume, $V \cdot 10^{-3}$, cm^3/g	Total pore volume radius interval, nm	Mesopore volume $V \cdot 10^{-3}$, cm^3/g	Mesopore radius range, nm
AC20 grit AC20 100/80	Diamond powder (DSTU 3292-95)	1	1,42	0,90	0,3–17,2	0,88	1,0–17,2
	Chemical modification	2	1,55	0,57	0,3–17,2	0,54	1,0–17,2
	HVED modification	3	1,42	0,55	0,3–17,2	0,54	1,0–17,2

The average pore radius of the grinding powder of the AC20 100/80 brand after VER modification is 1.42 nm and is identical to the average pore radius of the original sample. At the same time, the total pore volume decreases to $0.55 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{g}$ relative to the value of the pore volume in the original sample of $0.90 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{g}$.

For comparative analysis at the quantitative level of indicators of changes in the state of the surface of the powders after modification, a linear approximation ($y=ax+b$) of the pore and mesopore size distribution curves was performed, and the coefficients (a, b) were established with the reliability of the approximation R^2 (Table 4). The ratio of the coefficients a_2/a_1 (where a_1 is the coefficient of the equation of the pore distribution curves by the total pore volume, a_2 is the coefficient of the equation of the pore distribution curves by the total mesopore volume) allows us to establish the proportion of the mesopore volume in the total pore volume.

Table 4

Results of linear approximation of pore size distribution curves

Sample №	Linear approximation of pore size distribution curves (y=ax+b)						The proportion of mesopore volume in the total pore volume, (a ₂ /a ₁), %
	Coefficients of the equation of pore distribution curves by total pore volume		Accuracy of approximation, R ²	Coefficients of the equation of pore distribution curves by total vesopore pore volume		Accuracy of approximation, R ²	
	a ₁ ·10 ⁻³	b ₁ ·10 ⁻³		a ₂ ·10 ⁻³	b ₂ ·10 ⁻³		
1	0,0561	0,0932	0,84	0,0406	0,2829	0,87	72,37
2	0,0367	0,0270	0,89	0,0306	0,1019	0,86	83,38
3	0,0363	0,027	0,89	0,0223	0,2261	0,78	61,43

As follows from the results, the studied samples have a developed mesoporous surface structure, as evidenced by the proportion of the mesopore volume in the total pore volume of the original powders equal to 72–83%. After chemical modification, the proportion of the mesopore volume increases by 11%, after HER modification, the proportion of the mesopore volume decreases by 11%.

Conclusions

The results of the study established:

- the study of the influence of the methods of modifying the initial powder, in particular by chemical and VER methods, on the change in the adsorption-structural and morphometric characteristics showed that the value of the specific surface area of the initial samples tends to decrease after the modification of the powders;

- the studied samples have a developed mesoporous surface structure. The use of modification by the methods of liquid-phase oxidation and pulsed treatment with high-voltage electric discharges in an aqueous environment of the initial synthetic diamond grinding powder allows changing the values of the adsorption-structural characteristics of the powders: in particular, the specific surface area; specific pore volume; average pore radius; total pore volume; distribution of the pore volume by their sizes;

- the studied modification methods do not show a significant effect on the morphometric characteristics of the powders;

- comparative analysis of the results by the coefficients of linear approximation of the pore size distribution curves allows us to obtain at the quantitative level the indicator (a_2/a_1) of the change in the state of the powder surface, which can serve as a characteristic of the quality of the powder surface when studying the surface defects of synthetic diamond grains and its influence on the operational characteristics of a diamond tool;

- the obtained results provide a basis for further development of a database for the formation of optimal indicators of adsorption-structural characteristics of synthetic diamond powders of wide functional purpose.

The study was carried out on the topic III-4-25 (0789) “Study of the surface defects of synthetic diamond grains of a wide range of strength (AC6-AC160) and its influence on the operational characteristics of a diamond tool”. State registration number 0125U000040. Registration of the Bureau of the VFTPM of the NASU dated 10.12.2024, protocol No. 23; under the Memorandum of Cooperation between Lutsk National Technical University and the V.M. Bakul Institute of Superhard Materials (No. 17 dated 01/30/2024) and under the Memorandum No. 18 dated 06/19/2025 on cooperation between the IIPT of the NAS of Ukraine and the V.M. Bakul Institute of Superhard Materials of the NAS of Ukraine.

Список використаних джерел

1. Алешин В. Г., Смахнов А. А., Богатырева Г. П., Крук В. Б. Химия поверхности алмаза. Киев: Наук. думка, 1990. 200 с.
2. Никитин Ю. И., Уман С. М., Коберниченко Л. В., Мартынова Л. М. Порошки и пасты из синтетических алмазов. Киев: Наук. думка, 1992. 284 с.
3. Руденко А. П., Кулакова И. И., Скворцова В. Л. и др. Влияние катализаторов на взаимодействие алмазов с газовыми и жидкими средами. Взаимодействие алмазов с газовыми и жидкими средами. Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 1984. С. 58–74.
4. Сизоненко О. Н., Олейник Н. А., Петасюк Г.А. и др. Влияние электроэрозивной обработки алмазных порошков на изменение их физико-механических характеристик. Порошковая металлургия. 2013. № 7/8. С. 3–8.
5. ДСТУ 3292-95. Порошки алмазні синтетичні. Загальні технічні умови. Чинний від 1997-01-01. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України, 1996. 70 с.
6. Грег С., Синг К. Адсорбция, удельная поверхность, пористость. - М.: Мир, 1984. 306 с.

Рецензент: Павло БАРВІЦЬКИЙ, старший науковий співробітник Інституту надтвердих матеріалів Ім.В.М. Бакуля НАН України, к.т.н., ст.досл.

В. Пуць, М. Ярошевич, Т. Ярошевич, Є. Станкевич

Луцький національний технічний університет

**САМОСИНХРОНІЗАЦІЯ ВІБРОЗБУДНИКІВ ВІБРАЦІЙНИХ МАШИН
З БІГАРМОНІЧНИМИ КОЛИВАННЯМИ РОБОЧОГО ОРГАНУ**

Розглянуто практичну можливість самосинхронізації двох пар дебалансних віброзбудників з кратними частотами обертання. Задача розв'язується з використанням інтегрального критерію стійкості синхронних рухів. Отримано формули для синхронізуючих моментів; умови існування та стійкості синхронних режимів руху збудників. Наведені рівняння для визначення кутів зсуву фаз у можливих синхронних режимах руху віброзбудників. Сформульовані практичні рекомендації стосовно підвищення стабільності кратно-синхронного обертання віброзбудників. Теоретичні результати узгоджуються з результатами комп'ютерного моделювання

Ключові слова: вібраційна машина, бігармонічний коливання, дебалансний віброзбудник, самосинхронізація, вібраційний момент.

V. Puts, T. Yaroshevich, M. Yaroshevych, E. Stankevych

**SELF-SYNCHRONIZATION OF VIBRATION EXCITERS OF VIBRATING MACHINES
WITH BIHARMONIC OSCILLATIONS OF THE WORKING BODY**

The practical possibility of self-synchronization of two pairs of unbalanced vibration exciters with multiple rotation frequencies is considered. The problem is solved using the integral criterion of stability of synchronous movements. Formulas for synchronizing moments are obtained; conditions for the existence and stability of synchronous modes of motion of exciters. Equations are given for determining the phase shift angles in possible synchronous modes of motion of vibration exciters. Practical recommendations are formulated regarding increasing the stability of multiple-synchronous rotation of vibration exciters. Theoretical results are consistent with the results of computer modeling

Keywords: vibration machine, biharmonic drive, unbalanced vibration exciter, dynamic self-synchronisation, vibrational torque.

Постановка проблеми. Вібраційні машини з дебалансними віброзбудниками широко використовуються в самих різних виробництвах. У нинішній час створено та експлуатується велика кількість вібромашин різної конструкції, потужності й функціонального призначення [1-3]. Серед існуючих машин досить перспективними є вібромашини з бігармонічним законом коливань робочого органу. Двочастотні коливання у низці випадків можуть істотно підвищити ефективність вібромашин. Необхідною умовою нормальної роботи вібромашин з кількома віброзбудниками є синхронність обертання та наявність певного співвідношення між фазами збудників. На сьогодні проблема самосинхронізації обертання віброзбудників залишається актуальною при створенні вібромашин з бігармонічним законом коливань робочого органу [1, 2, 4, 5].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. На даний час явище самосинхронізації механічних віброзбудників досить добре вивчено. Огляд та узагальнення основних результатів теоретичних та експериментальних досліджень наведено, наприклад, у [1, 2]. Більшість існуючих досліджень присвячені, так званій, простій самосинхронізації віброзбудників, коли усі вони обертаються з однаковими (близькими) частотами. Самосинхронізації віброзбудників з кратними частотами, присвячені значно менше праць, зокрема [4-7]. В статті [8] демонструється можливість використання ефекту самосинхронізації інерційних віброзбудників для створення вібраційної техніки з законом коливань робочого органу, який можна змінювати в процесі роботи. У працях [7, 9] досліджується проходження резонансу вібромашинами з віброзбудниками, які самосинхронізуються; вказується на можливості покращення розбігу вібромашин у разі використання методу почергового та подвійного пусків електродвигунів. Робота [10] присвячена синтезу конструктивних параметрів двочастотного інерційного вібратора. У [11, 12] показано, що прикладні задачі самосинхронізації інерційних віброзбудників можна розв'язувати за методикою дослідження вібраційного захоплення обертання незрівноважених роторів.

Серед останніх досліджень, присвячених питанням самосинхронізації дебалансних віброзбудників, можна відзначити роботи [13, 14]. У статті [14] розглядається самосинхронізація віброзбудників бігармонічного чотиривального вібратора напрямленої дії. Проте, в [14] обґрунтовується можливість усунення з вібропривода лише однієї з трьох існуючих в конструкції привода кінематичних передач.

Мета дослідження. Продемонструвати можливість стабільної роботи бігармонічного чотиривального вібратора напрямленої дії з однією зубчастою передачею яка синхронізує обертання віброзбудників.

Методика дослідження. Для досліджень використано методи прикладної теорії механічних коливань, інтегральний критерій стійкості синхронних рухів, чисельне моделювання з використанням системи комп'ютерної математики Maple 14.

Опис системи та рівняння руху. Несуче тверде тіло (робочий орган вібромашини) пружно встановлено на нерухомій основі за допомогою досить «м'яких» пружних опор (рис. 1).

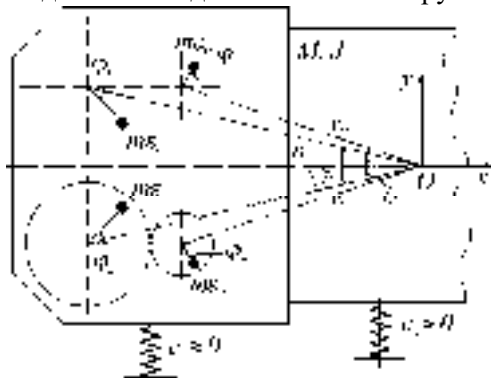


Рис. 1. Схема бігармонічного віброприводу

Тверде тіло може здійснювати малі плоско-паралельні коливання. Тобто, в загальному випадку, несуче тверде тіло має три ступені вільності. На несучому тілі встановлені дві пари номінально однакових дебалансних віброзбудників (1, 2 та 3, 4); при чому, частота обертання другої пари у два рази вища за частоту першої. Віброзбудники у парах обертаються у протилежних напрямках; 2-ий та 4-ий збудники з'єднані зубчастою передачею з передатним числом 1:2; 1-ий, 2-ий та 3-ій віброзбудники приводяться в обертання від незалежних електродвигунів асинхронного типу.

Диференціальні рівняння руху досліджуваної динамічної системи можна подати у такому вигляді [2]:

$$\begin{aligned}
 M\ddot{x} + \beta_x \dot{x} + c_x x &= \\
 &= m\varepsilon_I [\dot{\varphi}_1^2 \cos \varphi_1 + \dot{\varphi}_2^2 \cos \varphi_2] + m\varepsilon_{II} [\dot{\varphi}_3^2 \cos \varphi_3 + 4\dot{\varphi}_2^2 \cos(2\varphi_2 + \beta)], \\
 M\ddot{y} + \beta_y \dot{y} + c_y y &= \\
 &= -m\varepsilon_I [\dot{\varphi}_1^2 \sin \varphi_1 + \dot{\varphi}_2^2 \sin \varphi_2] - m\varepsilon_{II} [\dot{\varphi}_3^2 \sin \varphi_3 - 4\dot{\varphi}_2^2 \sin(2\varphi_2 + \beta)], \\
 J\ddot{\varphi} + \beta_\varphi \dot{\varphi} + c_\varphi \varphi &= \\
 &= -m\varepsilon_I r_I [\dot{\varphi}_1^2 \sin(\varphi_1 + \gamma_1) + \dot{\varphi}_2^2 \sin(\varphi_2 + \gamma_1)] - m\varepsilon_{II} r_{II} [\dot{\varphi}_3^2 \sin(\varphi_3 - \gamma_2) - 4\dot{\varphi}_2^2 \sin(2\varphi_2 + \beta - \gamma_2)], \\
 I_1 \ddot{\varphi}_1 &= L_1(\dot{\varphi}_1) - R_1(\dot{\varphi}_1) + m\varepsilon_I [\ddot{x} \sin \varphi_1 + \ddot{y} \cos \varphi_1 + \ddot{\varphi} r_I \cos(\varphi_1 - \gamma_1)], \\
 I_2 \ddot{\varphi}_2 &= -L_2(\dot{\varphi}_2) + R_2(\dot{\varphi}_2) - m\varepsilon_I [\ddot{x} \sin \varphi_2 + \ddot{y} \cos \varphi_2 + \ddot{\varphi} r_I \cos(\varphi_2 + \gamma_1)] - \\
 &= -2m\varepsilon_{II} [-\ddot{x} \sin(2\varphi_2 - \beta) + \ddot{y} \cos(2\varphi_2 - \beta) + \ddot{\varphi} r_{II} \cos(2\varphi_2 - \beta - \gamma_2)], \\
 I_3 \ddot{\varphi}_3 &= -L_3(\dot{\varphi}_3) + R_3(\dot{\varphi}_3) - m\varepsilon_{II} [\ddot{x} \sin \varphi_3 + \ddot{y} \cos \varphi_3 + \ddot{\varphi} r_{II} \cos(\varphi_3 - \gamma_2)],
 \end{aligned}$$

де M, J – маса та момент інерції несучого тіла, відносно осі яка проходить через центр мас; $q = x, y, \varphi$, φ_i – узагальнені координати несучого тіла та роторів віброзбудників, $i = 1, 2, 3$; при чому, $\varphi_4 = 2\varphi_2 + \beta$; β – кут зсуву фаз між 2-им та 4-им роторами віброзбудників; β_q, c_q – коефіцієнти в'язкого тертя та жорсткості пружних елементів підвіски несучого тіла; I_i – зведені моменти інерції роторів віброзбудників відносно осі обертання; $L_i(\dot{\varphi}_i)$ – обертальний момент електродвигуна; $R_i(\dot{\varphi}_i)$ – момент сил опору обертання ротора віброзбудника; r_i – відстань від осі i -го збудника до центру мас несучого тіла O ; γ_i – кути, які визначають положення осей роторів віброзбудників; m_i, ε_i – маса та ексцентриситет віброзбудника.

Викладення основного матеріалу. Для розв'язування прикладних задач про самосинхронізацію механічних віброзбудників може бути використана спрощена інженерна методика дослідження динамічної синхронізації - інтегральний критерій стійкості синхронних рухів віброзбудників [1, 4]. Згідно інтегрального критерію, стійкі синхронні рухи збудників відповідають точкам мінімуму, так званої, потенціальної функції D різниці фаз обертання збудників.

Оскільки, у розглядуваній технічній задачі, парціальні кутові швидкості збудників вважаються однаковими, то потенціальна функція дорівнює середньому значенню функції Лагранжа несучого тіла [1]. Функція Лагранжа Λ внаслідок припущення, що пружні опори несучого тіла є достатньо «м'якими», дорівнює його кінетичній енергії:

$$D = \Lambda = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} \frac{1}{2} [M(\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + J\dot{\varphi}^2] d\tau, \quad (2)$$

де $\tau = \omega t$.

Згідно методики інтегрального критерію, вихідну систему (1) достатньо розв'язувати за припущення про рівномірне обертання віброзбудників. Таким чином, $\varphi_1 = \omega t + \alpha_1$, $\varphi_2 = -(\omega t + \alpha_2)$, $\varphi_3 = -(2\omega t + \alpha_3)$, $\varphi_4 = 2\omega t + 2\alpha_2 - \beta$, де ω - кратно-синхронна частота обертання віброзбудників; α_i - сталі. У такому випадку рівняння руху несучого тіла перетворюються у звичайні лінійні диференціальні рівняння малих вимушених коливань. Тоді, з урахуванням розв'язків даних рівнянь, після усереднення виразу (2) отримуємо формулу для потенціальної функції:

$$D = -\frac{1}{2J\omega^2} \left[F_1^2 r_I^2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2) + \frac{F_2^2 r_{II}^2}{4} \cos(2\alpha_2 - \alpha_3 - \beta) \right] + C, \quad (3)$$

де $F_1 = m\varepsilon_I \omega^2$, $F_2 = 4m\varepsilon_{II} \omega^2$ - амплітуди вимушених сил, які розвивають віброзбудники першої та другої пар, відповідно; C - стала, що не залежить від фаз α_s .

Згідно технологічних рекомендацій, зазвичай приймають: $m\varepsilon_{II} = m\varepsilon_I/4$. Тоді, вираз (3) можна записати у дещо спрощеному вигляді:

$$D = -\frac{(m\varepsilon_I \omega)^2}{2J} \left[r_I^2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2) + \frac{r_{II}^2}{4} \cos(2\alpha_2 - \alpha_3 - \beta) \right].$$

Виконавши диференціювання по змінній α_i знайдемо вирази для вібраційних моментів:

$$\begin{aligned} V_1 &= \frac{m\varepsilon_I^2 \omega^2 r_I^2}{2J} \sin(\alpha_1 - \alpha_2), \quad V_3 = -\frac{m\varepsilon_I^2 \omega^2 r_{II}^2}{8J} \sin(2\alpha_2 - \alpha_3 - \beta), \\ V_2 &= -\frac{m\varepsilon_I^2 \omega^2}{2J} \left[r_I^2 \sin(\alpha_1 - \alpha_2) - \frac{r_{II}^2}{2} \sin(2\alpha_2 - \alpha_3 - \beta) \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

Як відомо, саме вібраційний момент при виконанні певних умов викликає динамічну синхронізацію роторів віброзбудників.

З (4) слідує, що сила динамічного зв'язку між першим та другим, а також - другим та третім віброзбудниками є такою ж, як у вібромашини з двома збудниками, які обертаються у протилежних напрямках з однаковими частотами. Важливо, що дана схема знайшла найбільш широке практичне використання серед усіх існуючих вібромашин зі збудниками, які самосинхронізуються.

Прирівнюючи до нуля похідні $\partial D / \partial \alpha_s = 0$, приходимо до системи рівнянь для визначення фаз обертання роторів віброзбудників у можливих синхронних рухах. Система рівнянь $\partial D / \partial \alpha_s = 0$ допускає кілька істотно різних груп розв'язків. Водночас, практично цікавим є лише одна група розв'язків:

$$\alpha_1 - \alpha_2 = 0, \quad 2\alpha_2 - \alpha_3 = \beta. \quad (5)$$

Таким чином, досліджувана динамічна система допускає синфазне обертання віброзбудників у парах, та синхронне обертання пар віброзбудників з кутом зсуву фаз β між ними.

Згідно інтегрального критерію, стійкі синхронні обертання віброзбудників відповідають точкам грубого мінімуму потенціальної функції. Необхідними та достатніми умовами мінімуму функції D в точках $\alpha_s = \alpha_i^*$, є виконання нерівностей (приймаємо $\alpha_3 = 0$):

$$\left| \frac{\partial^2 D}{\partial \alpha_1^2} \right|_{\alpha_s = \alpha_s^*} > 0, \quad \left| \begin{array}{cc} \frac{\partial^2 D}{\partial \alpha_1 \partial \alpha_1} & \frac{\partial^2 D}{\partial \alpha_1 \partial \alpha_2} \\ \frac{\partial^2 D}{\partial \alpha_1 \partial \alpha_2} & \frac{\partial^2 D}{\partial \alpha_2 \partial \alpha_2} \end{array} \right|_{\alpha_s = \alpha_s^*} > 0, \quad (6)$$

Дослідимо стійкість практично цікавої групи розв'язків (5). З (6) отримуємо наступні умови стійкості синфазного обертання віброзбудників у парах:

$$\frac{F_1^2 r_I^2}{2J\omega^2} > 0, \quad \frac{F_1^2 r_I^2 + F_2^2 r_{II}^2}{2J\omega^2} > 0. \quad (7)$$

Як бачимо, умови стійкості синфазного обертання віброзбудників теоретично виконуються завжди. Розв'язкам (5) відповідають поступальні бігармонічні коливання несучого тіла вібромашини вздовж осі Ox за законом:

$$x = -\frac{2F_I}{M\omega^2} \cos \omega t - \frac{2F_2}{M\omega^2} \cos(2\omega t - \beta) \quad (y \approx 0, \varphi \approx 0).$$

Однак, розв'язки (5) є не єдиним мінімумом потенціальної функції. Так, можливе синхронне обертання віброзбудників також з зсувами фаз: $\alpha_1 - \alpha_2 = \pi$, $2\alpha_2 - \alpha_3 = \beta$. Отже, крім розглянутого режиму руху можуть бути стійкими також побічні режими, зазвичай, совсім небажані. Відповідь на питання - який саме режим виникне при реальних початкових умовах та параметрах динамічної системи, можуть дати лише експериментальні дослідження.

Комп'ютерне моделювання самосинхронізації бігармонічних віброзбудників. Моделювання зводилося до чисельного інтегрування системи (1) та рівнянь динамічної моделі асинхронного електродвигуна [8]. Параметри системи відповідають параметрам експериментальної вібраційної установки [8]: $M = 108 \text{ кг}$; $m\varepsilon_I = 0,03 \text{ кг м}$; $I_1 = 0,01 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; $I_2 = 0,02 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; $I_3 = 0,006 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; $J = 2,1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; $\beta_{x,y} = 500 \text{ кг / с}$; $\beta_\varphi = 10 \text{ кг м}^2 / \text{с}$; $c_{x,y} = 3 \cdot 10^4 \text{ Н / м}$; $c_\varphi = 588 \text{ Н / м}$; $r_I = 1,28 \text{ м}$; $r_{II} = 0,94 \text{ м}$; $\gamma_I = 0,22 \text{ рад}$; $\gamma_{II} = 0,28 \text{ рад}$; при цьому, β кут встановлювався рівним $0,01 \text{ рад}$.

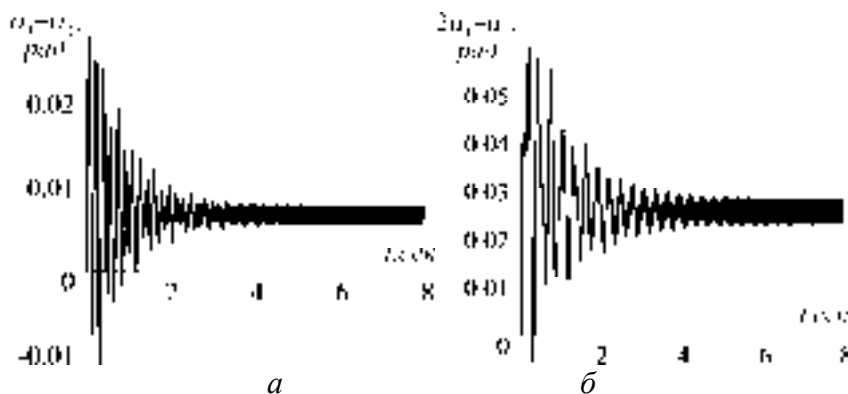


Рис. 2. Часові залежності різниці фаз між віброзбудниками: а) $\alpha_1 - \alpha_2$; б) $2\alpha_1 - \alpha_3$

Згідно рис. 2, достатньо швидко після пуску вібромашини встановлюється стабільне синхронне обертання усіх віброзбудників. При цьому, віброзбудники у парах обертаються практично синфазно, а кут зсуву фаз між 1-м та 3-м віброзбудниками встановлюється близький до кута, який виставляється в передачі між 2-им та 4-им збудниками. Перехідний процес нетривалий, коливання зсуву фаз незначні.

Висновки. Встановлено, що кратно-синхронне обертання віброзбудників бігармонічного привода можливо забезпечити за допомогою лише однієї кінематичної передачі. Використання явища самосинхронізації віброзбудників дозволяє зменшити динамічні навантаження у приводі; розширює можливості його компоновки. Характер синхронних рухів віброзбудників не залежить від кута зсуву фаз між збудниками з кратними частотами. Даний кут можна призначати лише згідно технологічних рекомендацій.

Список використаних джерел:

1. Blekhman I.I. Vibrational mechanics – Nonlinear dynamic effects, General approach, Applications. - Singapore at al.: World Scientific, 2000.
2. Blekhman I.I., Blekhman L.I., Dresig H. et al. Selected Topics in Vibrational Mechanics. - Singapore at al.: World Scientific, 2004, 409 p.
3. Ланець О.С. Високоєфективні міжрезонансні вібраційні машини з електромагнітним приводом (Теоретичні основи та практика створення). Львів, НУ «Львівська політехніка» (2008)
4. Ярошевич М.П., Ярошевич Т.С. Динаміка розбігу вібраційних машин з дебалансним приводом: монографія / Луцьк: ЛНТУ, 2010. – 220 с.
5. Blekhman I.I., Vasil'kov V.B. On Some Opportunities for Improving Vibration Machines with Self-Synchronization Inert Vibration Exciters. Journal of Machinery manufacture and reliability, 2013, Vol.42, №3, P. 192-195.
6. Blekhman I.I. Extension of the domain of applicability of the integral stability criterion (extreme properties) in synchronization problems. Journal of Applied mathematics and mechanics. Vol.68, No 6, pp.839-846, Elsevier Ltd. 2004.
7. Ярошевич М.П., Силивонюк А.В. Про деякі особливості динаміки розбігу вібраційних машин зі збудниками, що само синхронізуються.- Науковий вісник національного гірничого університету, 2013, № 4, С. 70-75.
8. Blekhman, I.I., Semenov, Y.A.: On the possibility of designing adaptive vibration machines with self-synchronizing exciters. Mechanisms and Machine Science, 80, 231-236 (2020)
9. Yaroshevich M.P., Zabrodets I.P., Yaroshevich T.S. Dynamics of vibrating machines starting with unbalanced drive in case of bearing body flat vibrations. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. Dnipropetrovsk, 2015, Vol. 3, P. 39–45.
10. Gursky V., Krot P., Korendiy V., Zimroz R. Dynamic Analysis of an Enhanced Multi-Frequency Inertial Exciter for Industrial Vibrating Machines. Machines 2022, № 10, 130. doi.org/10.3390/machines10020130
11. Yaroshevich N., Grabovets V., Yaroshevich T. et al. On the effect of vibrational capture of rotation of an unbalanced rotor. Mathematical Models in Engineering, 2023, Vol. 9, No. 2, pp. 81–93, <https://doi.org/10.21595/mme.2023.23273>.
12. Yaroshevich, N., Puts, V., Yaroshevich, T., (2024). Self-synchronization of vibration exciters of a biharmonic vibration drive *Vibroengineering Procedia*, 55, pp. 27–32.
13. Hu W., Cheng Z., Zhang X. et al. Self-balance characteristics of the vibrating system with four split-driving vibrators. Nonlinear Dyn, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11071-024-09804-4>
14. N. Yaroshevich, V. Puts, T. Yaroshevych, and V. Martyniuk, “Self-synchronisation of vibration exciters of a biharmonic vibration drive,” *Vibroengineering Procedia*, Vol. 55, pp. 27–32, Sep. 2024, <https://doi.org/10.21595/vp.2024.24416>

Г. М. Губаль¹, О. Б. Панасенко², В. М. Пугачов³

Луцький національний технічний університет¹,
 Вінницький державний педагогічний університет імені Михайла Коцюбинського²,
 Національний науковий центр "Інститут аграрної економіки"³

ТЕОРІЯ ІГОР У БІЗНЕСІ: МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ВЗАЄМОДІЇ

Стаття присвячена аналізу застосування математичних моделей теорії ігор у бізнесі для моделювання взаємодії економічних агентів, з акцентом на конкурентні стратегії, поведінку компаній та споживачів у динамічному ринковому середовищі. Отримані наукові результати демонструють, що теорія ігор ефективно моделює конкурентну поведінку компаній, зокрема через домінуючі стратегії та рівноваги Неша, дозволяючи прогнозувати наслідки цінових війн та зриву домовленостей, як у класичній дилемі ув'язненого. У моделюванні споживчої поведінки виділено феномен демонстративного споживання, де ігрові матриці витрат-вигод показують, як соціальні ефекти впливають на вибір, формуючи ігри з нульовою сумою та змішані стратегії для мінімізації витрат. У маркетингових рішеннях, на прикладі ринку систем кондиціонування, платіжні матриці з корекційними коефіцієнтами дозволяють визначати оптимальні комбінації стратегій, таких як розширення мережі чи рекламні кампанії, з урахуванням відсутності сідлових точок та переходу до ймовірнісних профілів. Модель Антуана-Огюстіна Курно ілюструє динаміку дуополії, де кооперативні стратегії забезпечують вищі прибутки, але конкурентні стимули, підкреслюють необхідність координаційних ігор для стійкого розвитку. Практична цінність дослідження полягає в наданні інструментів для бізнес-менеджменту, зокрема для оптимізації стратегій у маркетингу, логістиці та ціноутворенні, що допомагає компаніям мінімізувати ризики в умовах конкуренції та підвищувати прибутковість. Застосування запропонованих моделей дозволяє прогнозувати реакції конкурентів та споживачів, сприяючи ефективному прийняттю рішень у реальних ринкових ситуаціях, таких як роздрібна торгівля чи ланцюги постачання.

Ключові слова: теорія ігор, бізнес-стратегії, математичні моделі, конкурентна взаємодія, споживча поведінка, стратегічний розвиток.

H. Hubal, O. Panasenko, V. Pugachov

GAME THEORY IN BUSINESS: MATHEMATICAL MODELS OF INTERACTION

The article is devoted to the analysis of the application of mathematical models of game theory in business for modeling the interaction of economic agents, with an emphasis on competitive strategies, the behavior of companies and consumers in a dynamic market environment. The obtained scientific results demonstrate that game theory effectively models the competitive behavior of firms, in particular through dominant strategies and Nash equilibria, allowing the prediction of the consequences of price wars and the breakdown of agreements, as in the classical prisoner's dilemma. In modeling consumer behavior, the phenomenon of conspicuous consumption is highlighted, where payoff matrices of costs and benefits show how social effects influence choice, shaping zero-sum games and mixed strategies to minimize losses. In marketing decisions, illustrated by the example of the air conditioning systems market, payoff matrices with correction coefficients make it possible to determine optimal combinations of strategies, such as network expansion or advertising campaigns, taking into account the absence of saddle points and the transition to probabilistic profiles. The Cournot model illustrates the dynamics of a duopoly, where cooperative strategies provide higher profits, but competitive incentives lead to defection, emphasizing the need for coordination games for sustainable development. The practical value of the study lies in providing tools for business management, particularly for optimizing strategies in marketing, logistics, and pricing, which helps companies minimize risks under competition and increase profitability. The application of the proposed models allows forecasting the reactions of competitors and consumers, contributing to effective decision-making in real market situations such as retail trade or supply chains.

Keywords: game theory, business strategies, mathematical models, competitive interaction, consumer behavior, strategic development.

Вступ. В умовах динамічного розвитку ринкових відносин, коли бізнес-середовище постійно стикається з підвищеною невизначеністю, зростаючою конкуренцією та необхідністю прийняття ефективних стратегічних рішень, особливої значущості набувають методологічні інструменти, здатні забезпечити науково обґрунтований підхід до моделювання поведінки різних економічних агентів, і серед них теорія ігор займає провідне місце, оскільки дозволяє враховувати взаємозалежність рішень та формувати оптимальні стратегії в умовах багатосторонньої взаємодії. Застосування ігрових моделей у бізнесі охоплює широкий спектр завдань, що варіюється від макроекономічного рівня, де вони допомагають у формуванні збалансованої економічної політики та координації міждержавних рішень, до мікроекономічного рівня, де ці методи дозволяють досліджувати специфічні проблеми окремих галузей, підвищувати ефективність функціонування підприємств та вибудовувати адекватні системи внутрішнього управління. Особливої ваги набуває використання теорії ігор при вдосконаленні організаційних структур компаній, розробці гнучких систем мотивації персоналу та оптимізації управлінського обліку, оскільки саме ці сфери найбільш чутливі до впливу багатосторонніх інтересів і стратегічних дій учасників бізнес-процесів.

© Г. М. Губаль, О. Б. Панасенко, В. М. Пугачов

Актуальність дослідження визначається тим, що сучасний бізнес функціонує у складних мережах зовнішніх і внутрішніх комунікацій, де рішення одного суб'єкта безпосередньо впливають на результати діяльності інших, а отже, математичне моделювання таких взаємодій стає необхідним елементом ринкового управління і бізнес-розвитку.

Метою статті є дослідження прикладних засад використання математичних моделей теорії ігор для аналізу та прогнозування поведінки учасників бізнес-процесів, що передбачає виявлення оптимальних стратегій взаємодії компаній на конкурентних ринках.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В роботах [2, 13] вказується, що теорія ігор поступово перетворюється з суто математичної концепції на прикладний інструмент стратегічного аналізу, який активно використовується у різних сферах бізнесу. Значна увага приділяється моделюванню конкурентної взаємодії компаній, де основними інструментами виступають платіжні матриці, моделі Курно та Бертрана, а також сценарні підходи до аналізу цінових стратегій. Дослідження [4], [10] показують, що саме за допомогою теорії ігор можна кількісно оцінити наслідки кооперативних та некооперативних рішень, прогнозувати ризики цінових війн і визначати ймовірність виникнення рівноваги між учасниками ринку. Вчені [9, 17] показують, що можливим є використання ігрових моделей у маркетингу, де вони застосовуються для обґрунтування рішень щодо рекламних кампаній, диверсифікації асортименту, виходу на нові сегменти та формування індивідуальних стратегій просування. У роботах останніх років значний акцент робиться на розробці моделей поведінки споживачів з урахуванням ефектів демонстративного споживання, групового впливу та соціальних мереж, де рішення одного покупця може суттєво змінювати вибір інших.

Окреме місце, згідно з публікаціями [6, 15] займає аналіз логістичних процесів і ланцюгів постачання за допомогою ігрових підходів, адже в умовах нестабільності ринків питання оптимізації взаємодії між постачальниками, виробниками і дистриб'юторами потребує точних математичних моделей. Таким чином, сучасні дослідження у сфері бізнес-менеджменту демонструють, що інструменти теорії ігор виходять далеко за межі класичних прикладів конкуренції і стають універсальним засобом аналізу взаємодій у маркетингу, логістиці, стратегічному управлінні та цифровій економіці, що підкреслює їхню практичну значущість для розвитку бізнесу.

Виклад основного матеріалу. Домінуюча стратегія в бізнесі розглядається як оптимальний вибір компанії, який забезпечує найкращий результат незалежно від дій конкурентів, і саме ця логіка часто проявляється у ситуаціях жорсткої конкуренції між фірмами, коли прагнення кожного учасника максимізувати власний прибуток формує нові ринкові рівноваги та стимулює розвиток бізнес-середовища. У межах економічної науки під динамічною ймовірнісною еволюційною грою доцільно розуміти сукупність:

$$G = (\Omega, F, P, I, (Sm), R, A), \quad (1)$$

де: (Ω, F, P) – ймовірнісний простір, який відображає невизначеність бізнес-середовища та випадкові фактори, що впливають на результати стратегічних рішень;

I – множина початкових умов гри, які в контексті бізнесу можна трактувати як стартові ринкові позиції компаній, що визначають їхні конкурентні переваги;

Sm – множина стратегій гравця $m \in \{1, \dots, M\}$, які описують варіанти поведінки підприємств, включаючи вибір цінової політики, розширення асортименту, інвестиції у рекламу чи інновації;

R – відображення із підмножини $A \subseteq I \times S_1 \times \dots \times S_M$ у множину випадкових процесів на (Ω, F, P) з параметром $t \geq 0$, які приймають значення у просторі

$$M = \{r \in RM : r_1 + \dots + r_M = 1\},$$

що в економічному сенсі відображає розподіл ринкових часток або прибутку між усіма учасниками;

A – допустима множина пар початкових умов і профілів стратегій, що визначає можливі сценарії розвитку гри.

Профілем стратегій у грі G називається набір:

$$\Lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_M) \in S_1 \times \dots \times S_M. \quad (2)$$

Пара, що складається з початкової умови $i_0 \in I$ та профілю стратегій Λ , вважається допустимою, якщо $(i_0, \Lambda) \in A$. Відповідний процес $R_t(i_0, \Lambda) = [R(i_0, \Lambda)]t(\omega), t \geq 0$ називається процесом відносних активів гравців, а його компонента $R_m(i_0, \Lambda)$ визначається як процес відносних активів окремого гравця m .

Сутність даного визначення полягає в тому, що динамічна ймовірнісна еволюційна гра описує зміну активів компанії залежно від обраних ними стратегій та заданих початкових ринкових умов. Елементами множини I у загальному випадку є вектори з RM , які задають початкові значення активів компаній, і саме вони визначають стартові позиції бізнесу у конкурентній боротьбі. Стратегії учасників задаються елементами множин S_m та описують повний план дій фірми, що може враховувати випадковість ринкових процесів, початкові умови та інформацію про поведінку конкурентів. Відображення R ставить у відповідність початковим умовам і профілю стратегій випадковий процес зі значеннями у ΔM , тобто визначає, наскільки успішно виявляється стратегія кожного підприємства в конкретному наборі дій. Ми називаємо цей процес «процесом відносних активів», розуміючи під цим, що R_m відображає частку активів компанії m у сукупних активах всіх гравців. На даному етапі немає необхідності формально визначати процес абсолютних активів, хоча у прикладних бізнес-моделях відносні активи завжди обчислюється саме на основі абсолютних фінансових показників [5].

У цьому контексті прикладом може слугувати класична дилема ув'язненого, яка дозволяє пояснити причини зриву домовленостей між виробниками щодо фіксування цін, а також показує, чому спроби домовленості про припинення цінових війн часто зазнають краху, призводячи до розвалу спільних підприємств чи виходу країн із зон вільної торгівлі, якщо національні уряди чи компанії вбачають більші вигоди у протекціоністських діях [3, с. 28].

1. Моделювання поведінки компанії на ринку. Домінантне значення теорії ігор у бізнесі полягає у тому, що вона дозволяє осмислити залежність управлінських рішень від поведінки інших економічних агентів, що особливо актуально в умовах конкурентного ринку, де прибуток компанії визначається не лише її власними стратегіями, але й реакціями партнерів, постачальників чи конкурентів. Так, матриця «прибуток-віддача» відображає, яким чином фінансові результати двох компаній змінюються залежно від обраної цінової політики: якщо вони обидві обирають співпрацю та узгодження високих цін, їхні сукупні прибутки зростають, однак завжди залишається спокуса для одного учасника перейти до агресивної цінової стратегії, знижуючи ціни для захоплення більшої частки ринку, що врешті-решт може завдати збитків партнеру та зруйнувати досягнуту домовленість (табл. 1).

Табл. 1.

Матриця «прибуток – віддача» для двох конкуруючих фірм (млн грн)

Ціни, встановлені фірмою А	Ціни, встановлені фірмою В = 20 млн грн.	Ціни, встановлені фірмою В = 8 млн грн.
Фірма А = 20 млн грн.	480 млн А, 480 млн В	640 млн А, 80 млн В
Фірма А = 8 млн грн.	-80 млн А, 640 млн В	0 млн А, 0 млн В

1.1. Функції виграшу:

Позначимо виграші через $U_A(i,j)$, $U_B(i,j)$, де i – стратегія фірми А, j – стратегія фірми В.

Наприклад, $U_A(20,20)=480$, $U_B(20,20)=480$.

1.2. Аналіз рівноваги:

Якщо обидві компанії обирають співпрацю (20;20), то виграші високі: (480;480).

Якщо одна з них знижує ціну (8 проти 20), то отримає максимальний прибуток: $U_A(8,20)=-80$, $U_B(20,8)=80$.

Точка (8;8) є рівновагою Неша, оскільки жоден гравець не може збільшити прибуток односторонньою зміною стратегії, але виграші мінімальні: (0;0).

1.3. Формалізація. Якщо ймовірність того, що компанія А обирає високу ціну дорівнює p , а компанія В – q , тоді очікувані виграші мають вигляд:

$$\begin{aligned} E[U_A] &= pq \times 480 + p(1-q) \times 640 + (1-p)q \times (-80) + (1-p)(1-q) \times 0; \\ E[U_B] &= pq \times 480 + p(1-q) \times 80 + (1-p)q \times 640 + (1-p)(1-q) \times 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Таким чином, підприємства можуть комбінувати стратегії з певними ймовірностями, формуючи змішані стратегії для зниження ризику втрат.

2. Оцінка поведінки споживачів. Не менш форматною визначаємо і роль теорії ігор у моделюванні поведінки споживачів, оскільки саме вони формують попит, від якого безпосередньо залежить розвиток бізнесу. У неокласичних моделях традиційно виходять із того, що рівноважна ціна встановлюється на перетині кривої попиту та пропозиції, проте в сучасних умовах виникають ускладнення, пов'язані із соціальною природою споживання [7, с. 20]. Прикладом є феномен

демонстративного споживання, коли товари купуються не стільки заради їх функціональних властивостей, скільки для підтвердження статусу, престижу та підкреслення матеріального становища, що виводить економічну логіку на якісно інший рівень і змінює класичні уявлення про залежність ціни від корисності (табл. 2).

Табл. 2.

Матриця «витрати–вигоди» для стратегій демонстративного споживання (млн грн)

Стратегія / Фірма А	Фірма В = Демонстративне споживання	Фірма В = Економія коштів
Фірма А = Демонстративне споживання	(-50 млн; -50 млн) – обидві компанії зазнають витрат без реального зростання статусу	(200 млн; -100 млн) – А отримує статусну вигоду, В втрачає
Фірма А = Економія коштів	(-100 млн; 200 млн) – А втрачає статус, В отримує вигоду	(0 млн; 0 млн) – обидві компанії уникають додаткових витрат

В представленій моделі поведінка споживача також піддається ігровому аналізу: індивіди постають перед вибором та здійснювати витрати на предмети розкоші з метою отримання додаткових статусних вигод чи утримуватися від таких витрат, економлячи ресурси. Виграші та втрати в такій грі залежать від рішень інших гравців: коли один демонстративно споживає, а інший ні, перший отримує додаткову соціальну користь, а другий опиняється у відносно менш вигідному становищі; коли ж обидва гравці купують дорогі речі, статусна вигода нівелюється, і вони несуть лише додаткові витрати [16, с. 738]. Саме тому такі ситуації можна описувати як ігри з нульовою сумою, де перевага одного гравця досягається за рахунок втрат іншого.

2.1. Функції виграшу:

$$\begin{aligned}
 U_A(luxury, luxury) &= -50, U_B(luxury, luxury) = -50; \\
 U_A(luxury, save) &= 200, U_B(luxury, save) = -100; \\
 U_A(save, luxury) &= -100, U_B(save, luxury) = 200; \\
 U_A(save, save) &= 0, U_B(save, save) = 0.
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

2.2. Рівновага:

У цій грі рівновага Неша – профіль (0;0), коли обидві сторони обирають економію коштів, адже будь-яка відхилена стратегія веде до гіршого результату. Проте існує стимул до відхилення: якщо один гравець споживає «розкіш», він отримує вигоду 200, але лише тоді, коли інший утримується.

2.3. Формалізація змішаної стратегії:

Нехай ймовірність демонстративного споживання у гравця А дорівнює p , у гравця В – q . Тоді очікувані виграші:

$$\begin{aligned}
 E[U_A] &= pq \times (-50) + p(1-q) \times 200 + (1-p)q \times (-100) + (1-p)(1-q) \times 0, \\
 E[U_B] &= pq \times (-50) + p(1-q) \times (-100) + (1-p)q \times 200 + (1-p)(1-q) \times 0
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

3. Методи теорії ігор набувають особливої ваги у процесі прийняття маркетингових рішень у сфері роздрібної торгівлі, оскільки саме ця галузь постійно функціонує в умовах високого рівня ризику та значної невизначеності, що зумовлено швидкою зміною споживчих уподобань, зростанням конкуренції та непередбачуваними зовнішніми факторами. Для кращого розуміння механізму застосування ігрового підходу розглянемо приклад двох конкурентів, які працюють на ринку систем кондиціонування і вентиляції. Припустимо, що в певному регіоні частка першої компанії становить 60 %, тоді як друга утримує 40 % відповідного сегмента, і обидві вони націлені на нарощування продажів та розширення ринкової присутності [1, с. 316].

Задля досягнення стратегічних цілей кожна компанія має у своєму розпорядженні кілька альтернативних варіантів дій: $A_1(B_1)$ – інвестиції у розширення торгівельної мережі, $A_2(B_2)$ – активізація рекламних кампаній, $A_3(B_3)$ – диверсифікація та розширення асортименту продукції, $A_4(B_4)$ – утримання статус-кво без активних змін у бізнес-моделі. При цьому проведений попередній маркетинговий аналіз показав, що реалізація тих чи інших стратегій обома учасниками ринку по-різному впливає на зміну частки першої компанії, що дозволяє відобразити результати у вигляді

платіжної матриці, яка наочно демонструє, як залежність між вибором стратегій конкурентів формує нові ринкові позиції та впливає на фінансові результати обох сторін.

Абсолютно очевидним є те, що для обох компаній ключовим завданням виступає активне просування власної продукції, адже саме від цього залежить не лише короткострокова прибутковість, а й довгострокове стратегічне закріплення позицій на ринку, що в умовах сучасної конкуренції набуває першорядного значення. Водночас у розпорядженні гравців перебуває повна інформація у формі платіжних матриць, і тому виникає необхідність у виборі такої стратегії, яка б враховувала інтереси обох учасників у відносно збалансованому вигляді, мінімізуючи ризики односторонніх втрат. Виключивши з розгляду домінантної стратегії (наприклад, четвертий варіант бездіяльності), які не здатні забезпечити позитивного результату, та додавши умовний коефіцієнт корекції у розмірі 10, ми отримуємо оновлену платіжну матрицю, яка відображає можливості для побудови «позитивних ігор» [8].

У результаті розрахунків нижня ціна гри становить $\alpha = 4$, тоді як верхня $\beta = 6$, тобто дана гра не має сідлової точки, яка за своєю природою відображала б такий елемент матриці, що є водночас мінімальним у своїй рядковій стратегії та максимальним у відповідному стовпцевому варіанті. За відсутності такого оптимального елемента учасники бізнес-процесу вимушені переходити до змішаних стратегій, що у практичному вимірі означає необхідність поєднання кількох варіантів дій із різними ймовірностями їх застосування. Для другого підприємства це завдання можна записати у вигляді системи обмежень:

$$\begin{aligned} x_1 + x_2 + x_3 &\rightarrow \max, \\ 3x_1 + 2x_2 + 6x_3 &\leq 1, \\ 4x_1 + 7x_2 + 5x_3 &\leq 1, \\ 6x_1 + 3x_2 + 2x_3 &\leq 1, \\ x_i &\geq 0, i = 1, 2, 3. \end{aligned} \quad (6)$$

Розв'язання даної системи показує, що першій компанії найбільш вигідно орієнтуватися на стратегію A_1 (наприклад, інтенсивне розширення дистриб'юторської мережі), тоді як другій компанії доцільніше робити ставку на стратегію B_2 (масштабні рекламні кампанії та просування бренду). Відмова від таких стратегій або їх несвоечасна реалізація призводять до значних ризиків: для першої компанії – це втрата частки ринку і зниження прибутковості, а для другої – замість очікуваного приросту частки збуту може настати її скорочення, що прямо впливає на фінансові результати та конкурентоспроможність бізнесу. Як демонструє приклад, теорія ігор може ефективно застосовуватися компаніями при виборі стратегії просування та продажу продукції, оскільки вона дозволяє заздалегідь оцінити ймовірні результати діяльності, спрогнозувати реакцію конкурентів і навіть передбачити зміни у споживчій поведінці [14, с. 50].

4. Модель Курно, що отримала свою назву на честь французького математика Антуана-Огустіна Курно, який вперше представив її ще у 1838 році, посідає ключове місце у теорії ігор, оскільки дозволяє описати поведінку компаній на ринку з обмеженою кількістю гравців, зокрема у випадку дуополії, коли існують лише два основних виробники, які конкурують між собою за споживача. Концептуально ця модель близька до дилеми ув'язненого, адже вибір стратегії кожної компанії визначає не лише її власні фінансові результати, а й безпосередньо впливає на доходи конкурента.

Припустимо, що дві компанії, A та B , випускають однорідний продукт і можуть обирати між високим та низьким рівнем виробництва. Якщо обидва виробники координують свої дії та згоджуються на низький рівень випуску, обмежена пропозиція сприяє підвищенню ринкової ціни й гарантує обом значні прибутки. Якщо ж обидві компанії переходять до надмірного виробництва, ринок переповнюється товарами, що веде до падіння ціни й суттєвого зменшення прибутковості. У ситуації, коли один виробник обирає кооперативну стратегію з низьким рівнем виробництва, а інший застосовує функцію «дезертир» й збільшує обсяги випуску, перший виходить лише на рівень безбитковості, тоді як другий отримує підвищений прибуток завдяки захопленню більшої частки ринку (табл. 3) [11].

Ця матриця демонструє, що стратегія спільного виробництва на низькому рівні забезпечує обом сторонам прибутки у розмірі 4 млн грн кожній. Якщо компанія A співпрацює, а компанія B виходить з ринку, то виграш дорівнює 0 млн грн для A та 7 млн грн для B . У протилежному випадку ситуація симетрична: A отримує 7 млн грн, а B залишається на рівні безбитковості.

© Г. М. Губаль, О. Б. Панасенко, В. М. Пугачов

Табл. 3.

Матриця виплат для двох компаній (млн грн)

Модель Курно	Компанія В співпрацює	Компанія В дезертир
Компанія А співпрацює	(a) 4; 4	(b) 0; 7
Компанія А дезертир	(c) 7; 0	(d) 2; 2

При одночасному виборі стратегії дефекції обидві компанії заробляють лише по 2 млн грн. З точки зору бізнес-розвитку така модель дозволяє пояснити, чому навіть за наявності стимулів до співпраці компанії часто обирають конкурентні стратегії, адже короткострокова вигода від агресивної поведінки здається більш привабливою, ніж довгострокове збереження стабільності та високих прибутків. У сучасному ринковому середовищі, де конкуренція посилюється завдяки глобалізації, ця логіка набуває ще більшої актуальності, оскільки компанії змушені балансувати між тактичними діями та стратегічним розвитком [12].

Окремий клас становлять координаційні ігри, у яких гравці отримують вищі виграші, якщо їхні дії узгоджені. Дилема ув'язненого навчає нас, що просте співробітництво не завжди відповідає інтересам окремих гравців, однак у бізнесі існують ситуації, коли спільні узгоджені дії дають обом сторонам більші результати, ніж індивідуальна стратегія. Прикладом можна вважати ринок автомобілів: для споживача оптимальним варіантом стає ведення переговорів щодо знижки, тоді як дилерський центр зацікавлений у дотриманні жорсткої цінової політики для максимізації прибутку. Якщо обидві сторони не йдуть на поступки, покупець переплачує, а компанія ризикує втратити клієнта. Однак координація у переговорах дозволяє сформувати «виграшну» ситуацію, за якої бізнес отримує продаж, а клієнт – справедливую ціну. Таким чином, теорія ігор у бізнесі доводить, що гармонізація стратегій між компаніями та споживачами здатна не лише підвищувати прибутковість, але й формувати стійкий розвиток ринкових відносин у довгостроковій перспективі.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Встановлено, що математичні моделі теорії ігор забезпечують комплексний опис процесів конкурентної взаємодії між компаніями та споживачами, створюючи науково обґрунтовану платформу для розробки стратегічних рішень, які підвищують ефективність управління підприємствами та зміцнюють їхні ринкові позиції. Доведено, що домінантні стратегії суттєво впливають на формування цінових рівноваг у бізнес-середовищі. Прагнення окремих компаній до максимізації власного прибутку часто призводить до розпаду кооперативних угод, інтенсифікації конкурентної боротьби та виникнення ситуацій, що погіршують загальні показники ринкового розвитку.

Підтверджено ефективність прикладних ігрових моделей, включаючи матриці «прибуток-віддача» та «витрати-вигоди», для оцінювання потенційних результатів як для виробників при виборі цінової політики, так і для споживачів у контексті демонстративного споживання. Ці моделі виявляють соціальну природу економічної поведінки, що кардинально змінює традиційну логіку попиту і пропозиції. Продемонстровано високу ефективність динамічних ймовірнісних еволюційних ігор для моделювання довгострокових трансформацій у ринкових частках та формуванні активів компаній. Обґрунтовано критичну важливість моделей Курно, Бертрана та координаційних ігор для створення системи стратегічного управління, що враховує як конкурентний тиск, так і потенціал кооперації, гарантуючи сталий розвиток бізнесу в епоху глобалізації та цифрової економіки.

Список використаної літератури

1. Волосова Н., Стеблюк Н., Пилипенко А., Рябоволенко В., Небаба Н., Корнєєв М. Визначення конкурентних позицій у маркетинговій діяльності підприємств ресторанного бізнесу засобами математичного моделювання. *Financial and Credit Activity Problems of Theory and Practice*. 2025. № 1 (60). С. 309-322. DOI: 10.55643/fcaptp.1.60.2025.4639
2. Гаврись О., Сунь Ч., Кучіна С., & Гаврись М. Теорія ігор як інструмент прийняття оптимальних бізнес-рішень у зовнішньоекономічній діяльності підприємств. *Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" (економічні науки)*. 2024. № 4. С. 20-24. DOI: 10.20998/2519-4461.2024.4.20
3. Гуменюк Р. В. Прогнозування поведінки інвесторів крізь призму застосування новітніх договірних інструментів в концепції теорії ігор. *Український економічний часопис*. 2025. № 9. С. 26-30. DOI: 10.32782/2786-8273/2025-9-4
4. Карамушка М. В. Вибір оптимальної стратегії в умовах ризику за допомогою теорії ігор. *Економіка і суспільство*. 2017. № 9. URL: https://economyandsociety.in.ua/journals/9_ukr/75.pdf

5. Коваль З. О. Оцінювання стратегії підприємства методом теорії ігор. *Менеджмент та підприємництво в Україні: етапи становлення та проблеми розвитку*. 2021. № 2 (6). С. 47-55. DOI: 10.23939/smeu2021.02.047.
6. Куліш Д. Побудова моделі антагоністичної гри вибору стратегії зовнішньоекономічної діяльності в умовах диджиталізації. *Socio-Economic Relations in the Digital Society*. 2023. № 4 (50). С. 143-154. DOI: 10.55643/ser.4.50.2023.542
7. Македон В. В., Байлова О. О. Планування і організація впровадження цифрових технологій в діяльність промислових підприємств. *Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія «Економічні науки»*. 2023. Випуск 47. С. 16-26. DOI: 10.32999/ksu2307-8030/2023-47-3.
8. Шевченко С., Жданова Ю., Складанний П., & Бойко С. Теоретико-ігровий підхід до моделювання конфліктів у системах інформаційної безпеки. *Електронне фахове наукове видання «Кібербезпека: освіта, наука, техніка»*. 2023. № 2 (22). С. 168-178. DOI: 10.28925/2663-4023.2023.22.168178
9. AlOmari A. M. H. Game theory in entrepreneurship: a review of the literature. *Journal of Business and Socio-economic Development*. 2024. № 4 (1). p. 81-94. DOI: 10.1108/JBSED-01-2023-0005
10. Avanesova N., Tahajuddin S., Hetman O., Serhiienko Y., Makedon V. Strategic management in the system model of the corporate enterprise organizational development. *Economics and Finance*. 2021. № 1/2021. Vol. 9. pp. 18-30. DOI: 10.51586/2311-3413.2021.9.1.18.30.
11. Liu H., & Wu H. Game Theory in Business Decision-Making: A Strategic Approach to Competitive Market Dynamics. *Academic Journal of Management and Social Sciences*. 2025. № 11 (1). p. 145-154. DOI: 10.54097/e0wchb25
12. Lu J. Exploration on the Application of Game Theory in Business Competition Strategies. *International Journal of Global Economics and Management*. 2024. № 5 (1). p. 20-26. DOI: 10.62051/ijgem.v5n1.03
13. Mahajan Shalini, & Kaur Taranjot. Game Theory in Business: Strategic Decision-Making for Competitive Advantage. *International Journal for Multidisciplinary Research (IJFMR)*. 2024. № 6 (6). DOI: 10.36948/ijfmr.2024.v06i06.28524
14. Makedon V., Myachin V., Plakhotnik O., Fisunen N., Mykhailenko O. Construction of a model for evaluating the efficiency of technology transfer process based on a fuzzy logic approach. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. no 2(13(128)). p. 47-57. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300796>.
15. Marmon S. Game Theory Applications in Modern Business Strategy: Optimizing Competitive Decision-Making in Uncertain Markets. 2025. Posted: 18 February 2025. SSRN Electronic Journal. DOI: 10.2139/ssrn.5141929
16. Seto Y. Y. C. Game Theory in Strategic Management: Enhancing Decision-Making in Competitive Business Ecosystems. *Academic Economics & Management Research (AEMR)*. 2025. № 14 (1). p. 731-742. DOI: 10.56028/aemr.14.1.731.2025
17. Xu Y. Application of Game Theory to Business Decision-making. *SHS Web of Conferences*. 2024. Vol. 188. Art. 03008. DOI: 10.1051/shsconf/202418803008

С.Ф. Юхимчук, Т.Л. Дацюк, С.М. Юхимчук, Л.М. Дацюк

Луцький національний технічний університет

РОЗРОБКА НАХИЛЮВАЧА СТЕБЕЛ ЛЬОНУ ДЛЯ ЛЬОНОБРАЛЬНОГО АПАРАТА

У статті дано опис конструкції нахилювача стебел льону для дисково-пасового льонобрального апарата. Виготовлено експериментальну установку з нахилювачем стебел льону та в польових умовах перевірено її робоздатність. Встановлено, що використання нахилювача забезпечує гарантований нахил стебел, які підводяться подільниками до брального рівчака, цим самим зменшуючи в подальшому розтягнутість і перекіс стебел у стрічці. А також забезпечить перпендикулярність затиснутих у бральному рівчаку стебел льону, а значить покращить виконання наступних технологічних операцій льонозбиральної машини. Таких, як обчісування насінневих коробочок і розстил льоносоломи.

Ключові слова: стебла льону, подільник, нахилювач, льонобральний апарат.

S.F. Yukhymchuk, T.L. Datsyuk, S.M. Yuhymchuk, L.M. Datsyuk

DEVELOPMENT OF A DEVICE FOR INCLINING FLAX STALK FOR A FLAX-PULLING APPARATUS

The article describes the design of a device for inclining flax stalk for a disc-belt flax-pulling apparatus. An experimental setup with a device for inclining flax stalk was manufactured and its performance was tested in field conditions. It was established that the use of the device for inclining ensures a guaranteed tilt of the stalks, which are brought by dividers to the pulling streams, thereby reducing the stretching and skewing of the stalks in the belt. It also ensures the perpendicularity of the flax stalks clamped in the of the pulling stream, thus improving the performance of subsequent technological operations of the flax harvesting machine. Such as combing seed capsules and spreading flax straw.

Keywords: flax stems, divider, device for inclining, flax-pulling apparatus.

Постановка проблеми. Для розподілу стеблестою та підведення стебел до бральних рівчаків у льонозбиральних апаратах використовується подільники. Ці конструкції складаються з центрального і бічних прутків. Для запобігання поломки подільників при наїзді на перешкоду центральний пруток роблять телескопічним або ще додатково підпружинюють [1, 2, 3, 4].

При взаємодії стеблестою з бічними прутками подільників стебла відхиляються в бік і нахилиються вперед, а стебла, які розміщені навпроти бральних рівчаків і не взаємодіють з бічними прутками, тільки трохи відхиляється вперед через дію на них стебел нахилених подільниками або залишається вертикальними. Для бральних апаратів з поперечними бральними рівчаками (обладнані навісні льонобралки) у яких бральний апарат нахилений під кутом 15-25° до горизонту це було припустимо.

У бральних апаратах з поздовжніми бральними річками, які нахилені до горизонту на кут до 55-65°, для більшого нахилу стебел льону використовуються подільники з більшим загостренням, а значить і більшої довжини. Це призводить до збільшення металомісткості і погіршення якості роботи льонобральної машини на поворотах. Також ці подільники знизу обладнані додатковими прутками, положення яких регулюють вручну відповідно до характеристик стеблестою. Якщо льон прямостоячий їх відгинають в сторони, якщо полеглий навпаки відгинають до центру подільників. Але не всі механізатори знають як правильно відгинати ці прутки, або не хочуть це робити. В результаті стебла льону затискаються в бральних рівчаках не перпендикулярно до площини брального апарата. Це призводить до зниження чистоти обчісування головок, збільшується відхід стебел у плутанину і порушується паралельність стебел у стрічці.

Також, як і в бральних апаратах з поперечними бральними рівчаками, стебла, що розміщені навпроти бральних рівчаків і не взаємодіють з бічними прутками подільників мало нахилиються вперед. Це призводить до збільшення розтягнутості стебел та їх перекосу у стрічці. Також при збільшенні розтягнутості, а значить зміщені не тільки нижніх частин але й верхівок є небезпека обривів насінневих коробочок і втрати насіння.

Для того, щоб стебла в бральних рівчаках були перпендикулярні площині брального апарата потрібно так нахилити усі стебла в напрямку руху машини, щоб в момент затискання стебел у бральному рівчаку кут нахилу стебел був рівний куту нахилу брального апарата до поверхні поля. Подільники цього забезпечити не можуть. Тому актуальним є розробка додаткового пристрою для нахилення стебел льону, який би мав просту конструкцію і легко регулювався під різну висоту стеблестою льону.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Нами запропонований дисково-пасовий льонобральний апарат [5, 6], обладнаний нахиловачем стебел льону, схематично показаний на рис. 1.

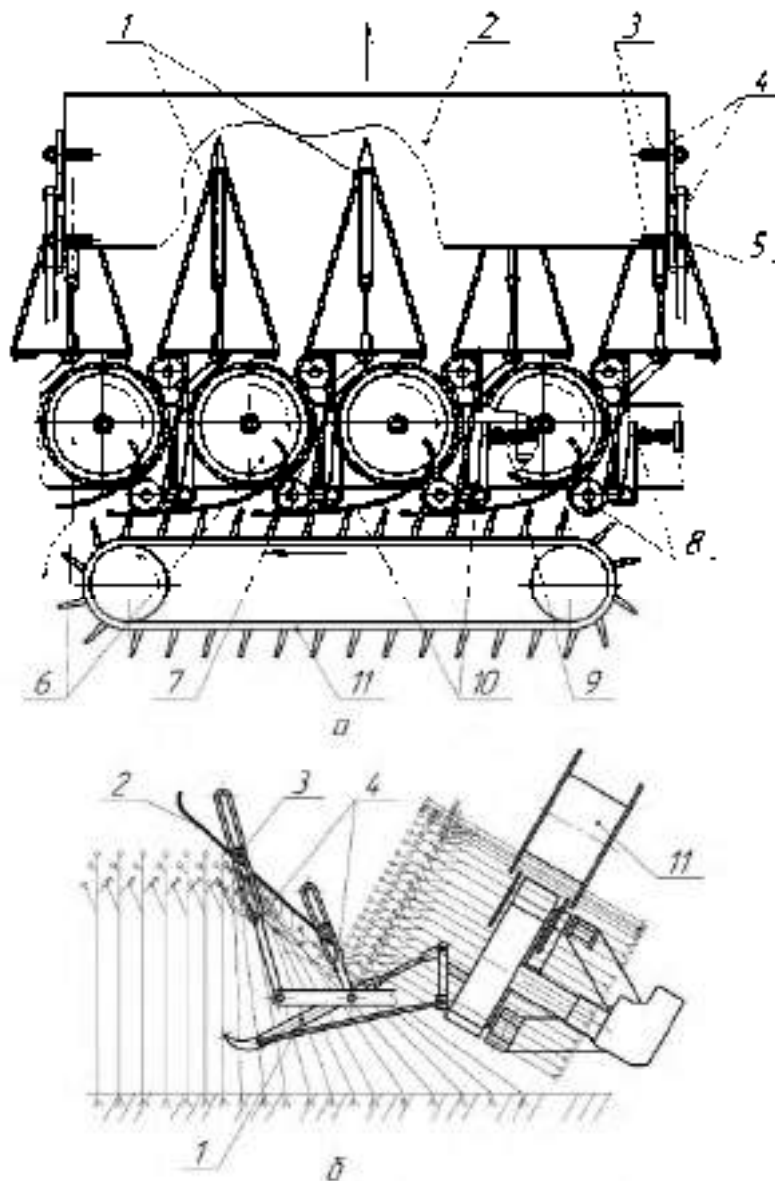


Рис. 1. Бральний апарат з нахиловачем стебел льону: 1 - подільники; 2 - поперечний щит, 3 - різьбові стержні, 4 - направляючі і 5 - гайки; 6 - бральні диски, 7 - бральні паси, 8 - ролики, 9 - підпружинені кріплення, 10 - напрямні прутки; 11 - поперечний транспортер; а – вид зверху, б – вид збоку

Бральний апарат з нахиловачем стебел льону містить: збірну раму (на рис. 1 не показана); подільники 1; нахиловач стебел льону, який складається із поперечного щита 2, виготовленого у вигляді лижі, з привареними по боках різьбовими стержнями 3, направляючих 4 і гайок 5; бральний вузол, який включає бральні диски 6, бральні паси 7, ролики 8, підпружинені кріплення 9, напрямні прутки 10; поперечний транспортер 11.

Бральний апарат з нахиловачем стебел льону працює наступним чином.

Відповідно до характеристик стеблостою льону проводиться налаштування нахиловача стебел льону, а саме, регулюється його положення відносно подільників та кут нахилу. Для цього послаблюються гайки 5 і різьбові стержні 3 переміщуються в пазах направляючих 4, шарнірно закріплених до рами брального апарата. Після виставлення щита 2 його положення фіксується затягуванням гайок 5 на різьбових стержнях 3. Для нерозкручування різьбових з'єднань вони додатково контргаяться ще одними гайками.

Привод бральних дисків, які обертаються в однаковому напрямку, здійснюється з картера рами. З одного боку кожен бральний диск 6, охоплюється бральним пасом 7, який надітий на ролики 8. За рахунок підпружиненого кріплення 9 верхнього ролика 8 забезпечується постійний натяг бального пасу 7, а значить і тиск в бральному рівчаку.

При русі машини по поверхні поля подільники 1 розділяють стебла льону на окремі смужки і направляють їх в гирла бральних рівчаків. Одночасно на верхівки стебел діє поперечний щит 2 нахилювача стебел льону, спричиняючи поступовий нахил стебел в напрямку руху агрегата на необхідний кут. Далше стебла льону затискаються між контактуючими поверхнями бральних дисків 6 і бральних пасів 7 перпендикулярно площині бального апарата, витягуються з ґрунту і переміщуються до виходу з бральних рівчаків, де захоплюються пальцями поперечного транспортера 11 і ковзаючи по поверхні напрямних прутків 10 переміщуються до виходу з бального апарата. В подальшому в залежності від типу льонозбиральної машини стеблова стрічка або розстеляється на льонище, або подається на наступні робочі органи льонозбиральної машини для обчісування насінневих коробочок.

Обладнання бального апарата нахилювачем стебел льону дає можливість нахилити стебла льону, які підводяться до гирл бральних рівчаків, на кут, який забезпечує їх затискання в бральному рівчаку перпендикулярно до площини бального апарата. Це дозволить знизити розтягнутість стеблової стрічки і перекіс стебел у стрічці. Також можна на льонобральному апараті використовувати коротші подільники з більшим кутом загострення, що знизить металомісткість та покращить роботу льонобального апарата на поворотах.

Постановка завдань. Перевірка роботоздатності запропонованої конструкції нахилювача стебел льону для льонобального апарата і його ефективності в польових умовах.

Викладення основного матеріалу.

Для перевірки роботоздатності запропонованої конструкції нахилювача стебел льону була виготовлена експериментальна установка, яка складається із візка на чотирьох колесах, і закріпленому на ньому двох подільників і нахилювача (рис. 2).



Рис. 2 – Фото експериментальної установки нахилювача стебел льону

Експериментальна установка мала такі розміри. Відстань між носиками подільників або ж ширина захоплення – 35 см. Подільник являє собою зварну конструкцію із центрального прутка діаметром 10 мм із загнутим на кінці носиком, загальна довжина цього прутка – 55 см. На відстані 7 см від кінця носика до центрального прутка приварені симетрично дві пари бічних прутків діаметром 6 мм. Верхні бічні прутки мали довжину 50 см, а нижні 40 см. Також на відстані 35 см від кінця носика до центрального прутка туло приварена втулка для шарнірного з'єднання подільника із стійкою. Для утримання подільника в заданому положенні до стійки приварений кронштейн. Між кронштейном і центральним прутком можна вставити пружину розтягу. При наїзді на перешкоду носок подільника піднімається і при проходженні перешкоди опускається в початкове положення. Висота розміщення подільника відносно поверхні поля регулювалася в межах 10-20 см, ширина зазору між кінцями бічних прутків сусідніх подільників на виході склала 5 см.

Щит нахилювача виготовлявся із листової сталі і мав ширину 40 см і довжину 60 см. Загнутий кінець щита характеризувався дугою довжиною 7 см і радіусом закруглення 12 см. Різьбові стержні по боках щита розміщувалися на відстані 4 см від нижнього краю щита і ще через 20 см.

Направляючі для кріплення різьбових стержнів були шарнірно встановлені на двох кронштейнах, які жорстко приєднувалися до стійок подільників. Довжини прорізей направляючих становила в більших 20 см, а в менших 15 см. Це забезпечувало зміну висоти встановлення направляючого щита, а також його кута нахилу і положення відносно носиків подільників.

Для детального вивчення процесу взаємодії подільників і нахилювача із стеблами льону збоку до візка на штативі кріпився смартфон, який працював в режимі відеокамери.

Досліди проводились на дослідному полігоні кафедри аградної інженерії імені професора Г.А. Хайліса ЛНТУ на посівах льону-довгунця сорту Міандр у серпні 2025 року. За стандартними методиками [7] були визначені характеристики посіву. Досліди проводились на стеблостій льону-довгунця таких характеристик: густота стеблостою – 1189 шт/м²; загальна висота стебел – 75,4 см; середній діаметр стебла (на 1/3 висоти) 1,41 мм; зона розміщення насінневих коробочок – 19,7 см; фаза стиглості – жовта; вологість стебел – 49,8 %, коробочок – 42,5 %; забур'яненість – 4.2 %; полеглість – відсутня.

Висота встановлення подільників становила 15 см, а щит нахилювача стебел льону встановлювався так, щоб верхня його частина була вище стеблостою льону – на висоті 80 см від поверхні поля, а нижня – на 40 см.

Експериментальна установка переміщалася по полю вручну із швидкістю ходьби дорослої людини – приблизно 5 км/год.

Результати можна побачити на фото, які були взяті із отриманих відеозйомок взаємодії нахилювача і подільників із стеблами льону (рис. 3).



а



б

Рис. 3 – Фото роботи експериментальної установки: а – обладнаної подільниками і нахилювачем стебел льону; б – обладнаною тільки подільниками

Нахилювач забезпечував гарантований нахил ісіх стебел (рис. 3,а). Величина кута нахилу забезпечується регулюванням положення щита, а саме висотою його встановлення. Кут нахилу і довжина щита нахилювача забезпечували плавне нахилення стеблостою і тим самим запобігали обриву насінневих коробочок.

Аналогічні дії були проведені на цій же установці із знятим нахилювачем (рис. 3,б). Тобто, коли із стеблостою взаємодіяли тільки подільники.

Як видно із фото рис. 3,б стебла льону взаємодіючи з бічними прутками подільників відхилялися до центру стеблової смуги, що формується подільниками. Але в напрямку руху експериментальної установки стебла льону мало відхилялися від вертикального положення. Це прийнятно тільки для бральних апаратів, які нахилені на невеликий кут до горизонту.

Висновки. Запропонована конструкція нахилювача стебел льону є роботоздатною, забезпечує гарантований нахил стебел, що підводяться подільниками до брального рівчака, цим самим

зменшуючи в подальшому розтягнутість і перекіс стебел у стрічці. А також забезпечить перпендикулярність затиснутих у бральному рівчаку стебел льону, а значить покращить виконання наступних технологічних операцій льонозбиральної машини, таких, як обчісування насіннєвих коробочок і розстил льоносолами.

Дана конструкція нахильовача стебел льону знаходиться на стадії проектування. Ця конструкція є новою, тому автори будуть дуже вдячні за зауваження і пропозиції по її вдосконаленню.

Список використаних джерел

1. Дацюк Л.М. Механізація комбайнового і роздільного способів збирання льону: монографія: / Л.М. Дацюк, Г.А. Хайліс, С.Ф. Юхимчук. – Луцьк: РВВ ЛНТУ, 2012. – 168 с.
2. Дідух В. Ф. Технології вирощування, збирання та переробки льону-довгунця : навч. посіб. / Дідух В. Ф., Ковалишин С. Й., Дударев І. М., Тараймович І. В. - Львів : Львівський НАУ, 2013. 324 с.
3. Дударев І.М. Теоретичні основи модернізації машин для виробництва льону: монографія / І.М. Дударев. – Луцьк: Ред.-вид. відділ Луцького НТУ, 2015. – 268 с.
4. Хайліс Г.А. Льноуборочные машины / [Г.А. Хайліс, Н.Н. Быков, В.Н. Бухарин и др.] – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с.
5. Патент на корисну модель № 153632 А01D 45/06 (2006.01) Дисково-пасовий льонобральний апарат. Юхимчук С.М., Толстушко М.М., Юхимчук С.Ф. Опубл. 02.08.2023 р. Бюл. № 31.
6. Юхимчук, С.М., Толстушко, М.М., Юхимчук, С.Ф., Дацюк, Л.М. Розробка конструкції дисково-пасового льонобрального апарата. Міжвузівський збірник наукових праць «Наукові нотатки» Зб. наук. статей. - Вип. 73. Луцьк: Ред.-вид. відділ ЛНТУ, . – 2022. С.239-242. <https://doi.org/10.36910/775.24153966.2022.73.35>
7. Хайліс Г.А. Механіка рослинних матеріалів: навчальний посібник / Г.А. Хайліс, Ю.В. Федорусь. – Луцьк: Ред.-вид. відділ ЛНТУ, 2009. – 204 с.

Рецензент: Ягелюк Світлана Володимирівна, професор кафедри товарознавства та експертизи в митній справі Луцького національного технічного університету, доктор технічних наук, доцент.

В. І. Осипенко, Л. Д. Мисник, М.В. Хандюк, Л.М. Мізнік

Черкаський державний технологічний університет

ОСОБЛИВОСТІ КІНЕТИКИ СУШІННЯ ТВЕРДИХ ВІДХОДІВ ПТАХОФАБРИК ЯК ОСНОВА УДОСКОНАЛЕННЯ СХЕМИ ВИРОБНИЦТВА ОРГАНІЧНИХ ДОБРІВ

У статті наведено результати експериментальних досліджень параметрів кінетики сушіння твердих відходів птахофабрик. Встановлено початкову середню вологість матеріалу та структуру зв'язку вологи з курячим послідом. На основі аналізу отриманих даних запропоновано вдосконалення машинно-апаратурної технологічної схеми установки утилізації курячого посліду із отриманням якісного органічного добрива

Ключові слова: вологість, оптимальні параметри, процес сушіння, кінетика, тверді відходи, курячий послід, буюкси, сушильна шафа, машинно-апаратурна схема, сушильні агрегати.

V.I. Osypenko, L.D. Mysnyk, M.V. Handiuk, L.M. Miznik

FEATURES OF THE KINETICS OF DRYING SOLID WASTE FROM POULTRY FARMS AS A BASIS FOR IMPROVING THE PRODUCTION SCHEME OF ORGANIC FERTILIZERS

The article presents the results of experimental studies of the kinetics of drying solid waste from poultry farms. The initial average moisture content of the material and the structure of the moisture-chicken manure bond were determined. Conditions for constant and decreasing drying rates were identified. Based on the analysis of the data obtained, improvements to the technological scheme of the machine and equipment for the chicken manure disposal plant were proposed, resulting in the production of high-quality organic fertilizer.

Keywords: moisture content, optimal parameters, drying process, kinetics, solid waste, chicken manure, weighing bottles, drying cabinet, machine and equipment diagram, drying units.

Statement of the problem. The use of advanced technologies and new equipment is associated with in-depth studies of the laws of physical and chemical processes in devices intended for the processing of raw materials and food production [1].

Over the past decade, poultry farming in Ukraine has undergone rapid development. This is evidenced by data from the State Statistics Service of Ukraine. Thus, the number of poultry increased from 123.3 million in 1998 to 210.4 million as of July 1, 2024, which is 70.6%. Such an active development of poultry production has led to a significant accumulation of production waste, in particular manure, at the level of 2.5 million tons per year [2].

Today, one of the most important environmental issues is preventing the accumulation of waste at poultry farms. Modern poultry farms are increasing the number of livestock to generate more profits. This leads to an increase in the volume of solid and liquid waste. Chicken manure is a solid waste at poultry farms. Chicken manure is processed using drying units to produce organic fertilizers.

Drying is the process of extracting moisture from solid, wet, paste-like, and liquid materials by evaporating it and removing the resulting vapor. In this case, moisture is removed from the material by diffusion from the inner layers to the surface and its evaporation into the environment [3]. Drying of wet materials can be divided into three consecutive periods: moisture movement to the surface of the material, evaporation of moisture from the surface (vaporization), and moisture movement in the form of steam from the product surface to the center of the air flow. The movement of moisture in a material is a diffusion process driven by the difference between the moisture concentration in the depths of the material and its surface. Since moisture evaporates from the surface of the material, its concentration in the depths of the material is higher than on the surface [4].

This is what makes drying different from other methods of moisture removal, such as absorbing it with chemicals or mechanical removal. The drying process is energy intensive. Therefore, the improvement of drying units is aimed at reducing energy consumption. To do this, first of all, the drying kinetics of a particular material is studied, which can be used to determine the moisture content of the material and the quantitative ratios of the forms of moisture bonding with the material. The form of moisture bonding with the material affects the amount of energy required to break this bond and is an important parameter that determines the choice of an efficient design of drying units and approaches to improving machine and equipment technological schemes for the utilization of chicken manure to produce high-quality organic fertilizer.

Analysis of recent research and publications. The mechanism of drying wet materials is determined mainly by the form of moisture bonding with the material and the drying regime. This issue was studied by scientists M.I. Pogozhkykh, V.O. Potapov, A.O. Pak, M.V. Zherebkin, O.O. Tertysnyi, O.A. Pivovarov, V.S. Koshulko. The classification of the form of moisture bonding with the material is based on

© В. І. Осипенко, Л. Д. Мисник, М.В. Хандюк, Л.М. Мізнік

the scheme of P.A. Rebinder. According to this scheme, the following types of bonding are distinguished [5]

- chemical bond (moisture bonding with the material in exact quantitative proportions);
- physical and chemical bonding (moisture bonding with the material in different, not precisely defined proportions);
- mechanical bonding (moisture bonding with the material in uncertain proportions).

To date, in Ukraine, the issues of improving the mechanism of waste recycling are dealt with by such scientists as: S.I. Sadchenko, S.V. Panukarenko, V.G. Smolyar, G.G. Geletukha, E.M. Kuzminsky, as well as a number of research and production associations, among which the SEC "Biomass" and LLC NPO "Technologies of the Future" make a significant scientific contribution.

Chicken manure is a moist material containing a significant amount of water. It is the object of study. Chicken manure is a colloidal body by nature and a capillary-porous material by structure. Water is in various bonds with the dry skeleton of the material, the pores of which can be filled with water, water vapor, and air. The drying process largely depends on the nature of the moisture bond with the material [5]. To find the moisture content of the material and the ratio of the mass of moisture that has a particular type of bonding with the material, drying kinetics graphs are used.

Most authors characterize the drying kinetics by four types of graphs [5]:

- a drying graph plotted in the coordinates ω (average moisture content of the material) and τ (drying time);
- drying rate graph in the coordinates $d\omega/d\tau$ (drying rate) and τ (drying time);
- drying rate graph in the coordinates $d\omega/d\tau$ (drying rate) and ω (average moisture content of the material);
- temperature curves in the coordinates θ (material temperature) and ω (average moisture content of the material).

Given the purpose of the work, the first two graphs are important. They will reveal the quantitative correlations of the nature of the moisture bond with the material and will make it possible to develop a methodology for obtaining material samples with the required moisture content.

If a material is dried at a constant air temperature t and relative moisture content φ , from which it is necessary to remove mechanically and physicochemically bound moisture, the dependence of moisture change on time is shown in the graph (Fig. 1). When removing mechanically bound moisture, the drying rate increases at the first stage, stabilizes to a constant value at the second stage, and begins to decrease at the third stage. Point C in Fig. 1 is called the critical point, it corresponds to the beginning of the removal of physicochemically bound moisture from the material. The moisture content corresponding to this point is called the critical moisture content of the material.

In Fig. 1, the period τ_0 corresponds to the time required to heat the material, the period τ_1 corresponds to the time required to remove free or mechanically bound moisture, and τ_2 corresponds to the time required to remove physically and chemically bound moisture.

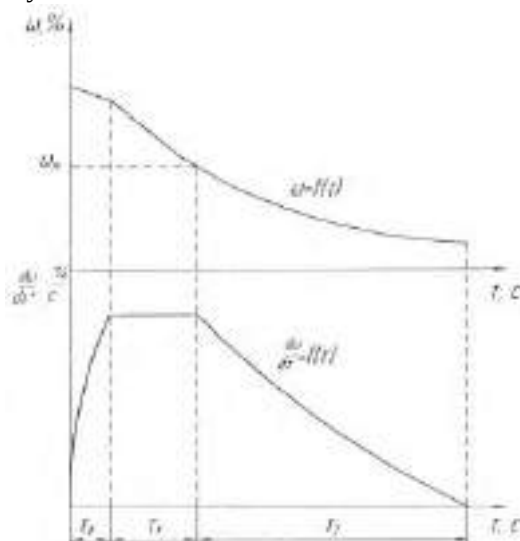


Fig. 1. Typical graphs of changes in moisture content ω and drying rate $d\omega/d\tau$ with time τ under conditions $t = \text{const}$, $\varphi = \text{const}$.

Objective. To obtain a graph for drying chicken manure, determine the moisture content of the material and track the quantitative indicators of the nature of the moisture bond with the material. Based on the analysis of the results obtained, to propose improvements to the technological scheme for the production of organic fertilizer based on chicken manure.

Presentation of the main material.

Equipment and research methods. Experiments on the kinetics of drying chicken manure were conducted in the laboratory.



The following equipment was used in the course of the experiment: a drying cabinet of the SNOL 75/350 type (Fig. 2); digital laboratory scales TVE "Technowagy", error 0.01 g; aluminum bins (aluminum bins No. 3 are used in many industries as a sample storage facility and for dried samples of grain seeds, sandy soil, fiber, sand, and other bulk materials); digital thermometer TFA 301018; chronometer; desiccator (glass vessel for storing dried samples in a dry atmosphere).

Experiments to determine the moisture content of chicken manure were conducted by the gravimetric method in accordance with DSTU EN 12049: 2005.

Fig 2. Drying chamber type SNOL 75/350

For the study, samples of material weighing from 19 g to 20 g were selected. Aluminum bins with manure were weighed on a digital scale. After that, the bins with open lids were placed in a drying oven heated from 95 °C to 105 °C. The material was dried to a constant weight, which was established by periodic weighing at intervals of 30 minutes. Prior to weighing, the aluminum bins removed from the drying oven were placed in a desiccator to cool to room temperature. When the difference in weight did not exceed 1% of the weight of the previous batch (the amount of substance accurately weighed for analysis), the study was terminated.

Results of the study.

Three weights were taken for the study, and their arithmetic mean was taken as the final result [6]. The experimental data are shown in Table 1.

The moisture content of the material was determined by the following formula [7]:

$$\omega = \frac{m_n - m_c}{m_n} \cdot 100\%, \quad (1)$$

where ω – material moisture content, %;

m_n – weight of the wet material sample, g;

m_c – weight of absolutely dry material, $m_c = 26,90$ g

Table 1.

Weight of chicken manure depending on drying time

Bin number	Empty bin weight, g	Weight of the bin with manure, g							
01035	19,55	40,72	39,81	37,41	34,40	31,44	27,79	26,97	27,06
01036	19,41	40,44	38,20	35,04	32,01	29,87	27,13	26,80	26,90
01037	19,31	40, 62	39,18	36,37	32,94	28,39	27,16	26,99	26,74
The average weight of the bin with manure, g		40,56	39,06	36,27	33,11	29,90	27,36	26,92	26,90
Experiment duration, min		0	30	60	90	120	150	180	210

The moisture content of chicken manure calculated by formula 1 is shown in Table 2.

The drying rate graph was obtained by differentiating the drying function [8] $\omega = f(\tau)$ using the formula:

$$\omega' = f'(\tau) = \frac{d\omega}{d\tau} = \tan \alpha, \quad (2)$$

where α – is the angle of inclination of the tangent at the point of the graph $\omega = f(\tau)$ to the abscissa axis.

Table 2.

Changes in moisture content of chicken manure depending on drying time

Duration of the experiment, min	0	30	60	90	120	150	180	210
Moisture content, %	33,69	31,13	25,83	18,76	10,03	1,68	0,07	0

Based on the experimental data, we plot the kinetics of drying chicken manure (Fig. 3).

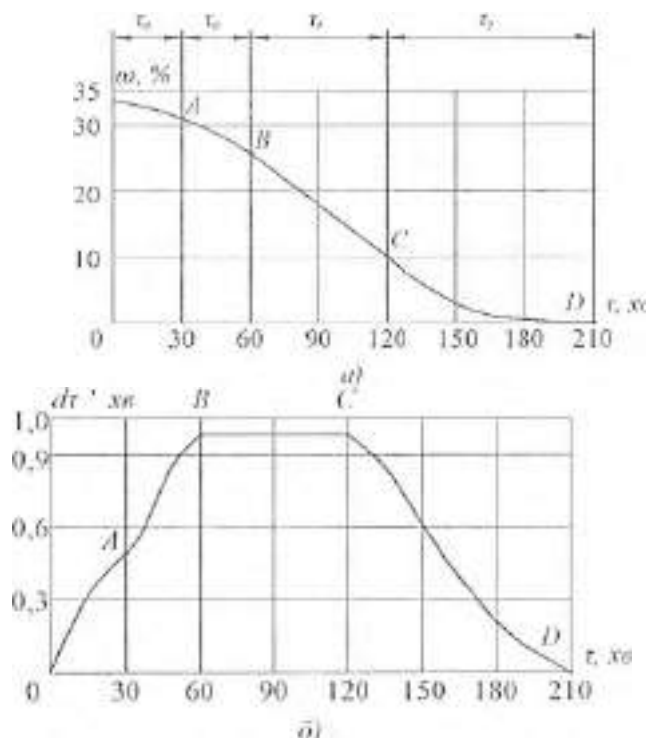


Fig 3. Graphs of the kinetics of drying chicken manure

a – graph of moisture content changes with drying time, b – graph of changes in drying speed versus drying time

Analyzing the drying graph for chicken manure, there are four stages of change in the drying rate:

The first stage. The drying rate at this stage is the lowest, because at this time the process of heating first the outer and then the inner layers of the material takes place during time τ_0 .

The second stage. The evaporation rate increases, but does not reach its maximum value, because the internal layers of the material have not yet reached the required temperature (time τ'_0 in Fig. 2). This stage does not exist in a typical material drying graph. This is because chicken manure has a peculiar structure, the composition of which is determined by solid lumps ranging in size from 0.1 mm to 1 mm, which have external and internal porosity. External porosity is the result of incomplete adhesion of particles. This structure of the material reduces the thermal conductivity of the material.

The third stage (time τ_1 in Fig. 2). The evaporation rate reaches a maximum and is constant over the entire time interval. The maximum drying rate is achieved by heating both the outer and inner layers of the material to the required optimum evaporation temperature, as well as by the structure of free moisture that is mechanically bound to the material.

The fourth stage (time τ_2 in Fig. 2). Point C corresponds to the critical moisture content ω_k , which is the beginning of the release of physicochemically bound moisture from the material. Subsequently, the rate decreases to a minimum and tends to zero. Only chemically bound moisture remains, the removal of which would lead to the destruction of the material and change its chemical and biological structure.

Paper [9] proposes a basic technological scheme for the production of organic-mineral fertilizer based on chicken manure, which consists of the following stages:

1. Averaging the litter material in a mixer to achieve homogeneity;
2. Granulation in a closed-type screw granulator to the size of granules with a diameter of 4 mm to 6 mm and a length of 15 mm to 20 mm;

© В. І. Осипенко, Л. Д. Мисник, М.В. Хандюк, Л.М. Мізнік

3. Drying the granules to a moisture content of $\approx 30\%$ in a filtration drying unit at a temperature of $T = 25^\circ\text{C}$;

4. Packing of the marketable fraction.

Taking into account the results of the research, we propose to change the technological process and the basic technological scheme of organic fertilizer production.

The technological process consists of:

1. Fermentation process. The initial stage of the production line is the fermentation of organic matter. During the preparation stage, the compost will be fed into the mixer for stirring, which will increase the efficiency and speed of fermentation.

2. Crushing process. During this process, the compost block is crushed through a crusher, ready for the pelletizing process,

3. The granulation process. The screw granulator is used for granulation of fertilizers.

4. Drying process. In order to change the shape of the granules and better preserve them, the moisture content of fertilizers should not exceed 14% . The filtration drying plant is widely used for drying fertilizer granules. Hot air is supplied by an electric heater.

5. Sieving process. It takes place on a vibrating screen. Too small or large fertilizer granules will be re-crushed and re-granulated.

6. Packaging process. The packaging process is the final stage of the entire plant. Generally, an automatic packaging machine will be more efficient for packing fertilizer into bags for sale.

7. Dust collecting system. Ash and dust will be collected in the cyclone, the air will be discharged into the atmosphere.

A schematic flow chart for the production of organic-mineral fertilizer based on chicken manure is shown in Fig. 4.

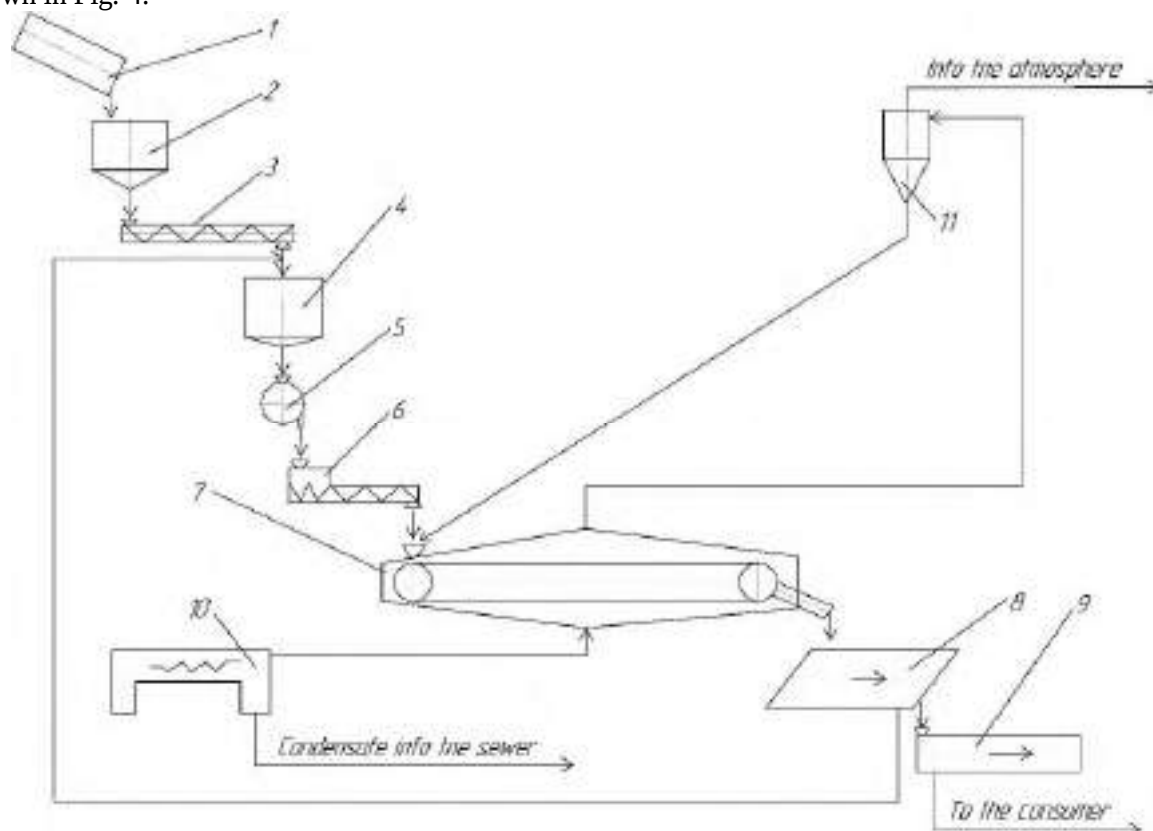


Fig 4. Schematic diagram of the production of organic fertilizer based on chicken manure

1 – tractor trailer; 2 – receiving hopper; 3 – screw conveyor; 4 – mixer; 5 – shredder; 6 – pelletizer; 7 – filtration drying unit; 8 – vibrating screen; 9 – packing machine; 10 – electric heater; 11 – cyclone

Chicken manure with bedding additives (e.g. sunflower husks, wood shavings, chopped corn cobs, sawdust, peat, straw) is delivered to the receiving hopper 2 by a tractor trailer 1. Then, the bedding material is fed by a screw conveyor 3 to a mixer 4, a shredder 5 and a pelletizer 6. The pellets are fed to the filtration drying unit 7, which is supplied with hot air from the heater 10. After drying, the pellets are fed to the vibrating screen 8. The pellets that meet the requirements are fed to the packing machine 9 and sent in bags

to consumers. Substandard pellets are fed to the mixer for re-processing. Ash and dust will be collected in the cyclone 11, and the air will be discharged into the atmosphere. Condensate from the heater is discharged into the sewer.

Conclusions.

1. The initial average moisture content of the material was found to be 33.69%. This parameter is extremely important for the selection and calculation of the optimal parameters of drying units.

2. Based on the obtained drying graphs, the structure of moisture bonding with chicken manure was determined: 20% of moisture is mechanically bound moisture, 10% of moisture is physicochemically bound moisture.

3. It was found that at an average moisture content of $\omega = 31.13\%$, a period of constant drying rate or a period of constant diffusion begins, and at an average moisture content of $\omega = 10.03\%$, a period of decreasing drying rate or a period of internal diffusion begins.

4. Based on the analysis of the results obtained, it is proposed to improve the technological process and the basic technological scheme for the production of organic fertilizer based on chicken manure.

References:

1. Processes and devices of food production. Heat exchange processes: Textbook / V.S. Boyko, K.O. Samoichuk, V.G. Tarasenko, O.P. Lomeiko. Melitopol, 2020. 300 p.
2. The number of livestock and poultry. Livestock (1990 – 2024): according to the State Statistics Service of Ukraine.
3. Cherevko A.M., Poperechnyi A.M. Processes and apparatus of food production: textbook / A.I. Cherevko, A.M. Poperechnyi. 2nd edition, supplemented and revised - Kharkiv.: Svit Knyg, 2014. – 495 p.
4. Tertyshny O.O., Pivovarov O.A., Koshulko V.S. Thermal processes and equipment in food production: Study guide - Dnipro: DDAEU, 2025. – 362 p.
5. Energy-efficient technologies and techniques for drying food raw materials: a textbook / M.I. Pogozhkhykh, V.O. Potapov, A.O. Pak, M.V. Zharebkin - Kharkiv: KhDUFT, 2016. – 234 p.
6. Khandyuk M.V. Analysis of the parameters of the kinetics of drying solid waste from poultry farms / O.O. Kovalenko, D.V. Kaptanovsky, M.V. Khandyuk // Bulletin of Cherkasy State Technological University. Series: Technical sciences. – No. 2. – Cherkasy: CHSTU, 2011. – PP. 157-160.
- 7 Mechanical and technological properties of agricultural materials. Methodical instructions for performing laboratory work for students of specialty 6.100202 – processes, machines and equipment of agro-industrial production and specialty 6.050503 – mechanical engineering: Compiled by I.G. Lypovyi. – Vinnytsia: VNAU, 2012 – 40 p.
8. Study of the classification, design and principle of operation of dryers. Methodical instructions for students majoring in 181 "Food Technologies" – Tavria State Agrotechnological University, 2017 – 17 p.
9. Kanda M.I. Ensuring environmental safety in the zone of influence of poultry farms: PhD thesis: [101– ecology]: [21.06.01 – environmental safety] / Kanda M.I. – Lviv, 2019. 144 p.

Р.Є. Костюнік¹, О.У. Стельмах¹, О.В. Кушчев^{1,2}

Державний університет «Київський Авіаційний Інститут»¹
Інститут проблем матеріалознавства НАН України ім. І.М. Францевича²

КОМПЛЕКСНЕ ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ ВИДАЛЕННЯ ЗАБРУДНЕНЬ З МИЮЧОЇ РІДИНИ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРИЛАДІВ, ВИКОРИСТОВУВАНИХ ДЛЯ ПРОМИСЛОВОЇ ОЧИСТКИ ПІДШИПНИКІВ

В статті розглядається проблема очищення підшипників кочення, шляхом видалення різного роду забруднень з робочих поверхонь і трактів кочення, та забрудненої при цьому використовуваної миючої рідини. Вирішення якої пропонується шляхом дослідження та використання комбінованих систем очищення, що поєднують фізико-хімічні та механічні методи фільтрації миючої рідини, адаптовані до специфіки видалених забруднень. Запропоновано використання оригінальної конструкції пристрою очищення мініатюрних шарикопідшипників комбінованими імпульсно-магнітними та ультразвуковими полями. Пристрій оснащено складною системою фільтрації миючої рідини. За результатами дослідження проаналізовано вимиті забруднення різної фізичної природи. Запропоновано рекомендації щодо використання комбінованих операцій очищення підшипників кочення ультразвуковими та імпульсно-магнітними полями як фінішних, для підвищення їх довговічності та експлуатаційної надійності.

Ключові слова: підшипники кочення, фільтри, очищення підшипників, забруднення різної фізичної природи

R.E. Kostyunik, O.U. Stelmakh, O.V. Kushchev

COMPLEX SOLUTION OF THE PROBLEM OF REMOVING CONTAMINATION FROM THE WASHING LIQUID OF TECHNOLOGICAL DEVICES USED FOR INDUSTRIAL CLEANING OF BEARINGS

The article considers the problem of cleaning rolling bearings by removing various types of contaminants from the working surfaces and rolling paths, and the contaminated cleaning fluid used in the process. The solution of which is proposed through the research and use of combined cleaning systems combining physico-chemical and mechanical methods of filtering the washing liquid, adapted to the specifics of the removed contaminants. The use of an original design of a device for cleaning miniature ball bearings with combined pulse-magnetic and ultrasonic fields is proposed. The device is equipped with a sophisticated filtering system of the washing liquid. Based on the results of the research, the washed pollution of various physical nature was analyzed. Recommendations are proposed for the use of combined operations of cleaning rolling bearings with ultrasonic and pulse-magnetic fields as finishing ones to increase their durability and operational reliability.

Keywords: rolling bearings, filters, bearing cleaning, contamination of various physical nature

Постановка проблеми Сучасні технології відновлення підшипників кочення широко використовують спеціалізовані мийні машини з системами рециркуляції миючої рідини. У процесі очищення підшипників від мастильних матеріалів, металевого пилу та експлуатаційних забруднень, миюча рідина зазнає значного забруднення та деградації. Накопичення твердих частинок, масел, присадок та інших домішок суттєво знижує ефективність очищення, збільшує час обробки та може призвести до повторного забруднення складових підшипника. Це не тільки погіршує експлуатаційні властивості вузлів та механізмів, але й збільшує ймовірність передчасного виходу підшипників із ладу.

В лабораторії «Нанотриботехнологій» ДУ «КАІ» розроблено спосіб та пристрій безконтактного очищення поверхонь тертя мініатюрних шарикопідшипників за допомогою комбінованих змінних імпульсних магнітних та ультразвукових полів. Експлуатація пристрою очищення показала, що внаслідок комбінованого впливу змінного імпульсного магнітного та гідравлічного полів відбувається перемагнічування як часток забруднень, так і робочих поверхонь, з одночасним взаємним просторовим переміщенням деталей шарикопідшипників у гідравлічному полі мийної рідини, яка переносить частинки забруднень за межі, у зону максимальної напруженості магнітного поля та направляє їх разом із використаною мийною рідиною в систему циркуляції для подальшої механічної фільтрації.

Фільтрація мийного середовища в стаціонарних мийних машинах, призначених для мініатюрних шарикопідшипників, є критично важливим аспектом підтримки ефективності очищення і продовження терміну служби мийної рідини та самої машини. Основний принцип полягає в забезпеченні безперервного видалення твердих частинок (наприклад, відокремленого мастила, частинок зносу, пилу) з мийної рідини під час її циркуляції всередині пристрою за допомогою системи фільтрації. Це запобігатиме повторному осіданню забруднень на очищені підшипники та забезпечить збереження ефективності мийної рідини.

Таким чином, актуальним завданням є розробка та впровадження ефективних методів очищення миючої рідини, що дозволяють максимально продовжити термін її служби та забезпечити стабільну якість очищення підшипників.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

У сучасній техніці для очищення в тому числі і технологічних рідин використовуються типи фільтрів, що відрізняються за ступенем очищення – грубим, нормальним, тонким та особливо тонким. Але найчастіше виділяють дві групи:

- грубого очищення — видаляють з рідини частинки розміром 50 мкм і більше (переважно являють собою металеві сітки з певним розміром клітин);

- тонкого очищення – видаляють з рідини частинки розміром понад 2 мкм.

За способом фільтрації можна виділити елементи з поверхневою та об'ємною адсорбцією.

У першому випадку використовуються відносно тонкі аркуші пористого матеріалу. Частинки забруднень, розміри яких перевищують розмір пор, не проходять крізь них і осідають на поверхні матеріалу. Для фільтрації часто застосовується спеціальний папір, але можливі й інші варіанти – тонка повстяна тканина, синтетичні матеріали.

У пристроях з об'ємною адсорбцією також використовується пористий матеріал, проте він товстіший і для відсіву забруднень використовується не тільки поверхня, а й внутрішні шари. Фільтруючий елемент може бути у вигляді керамічного композиту, волокон та ін.

Бар'єрні фільтри утворені зазвичай наступними фільтруючими елементами:

- сітчастою чи комірчастою структурою, через яку неспроможні пройти великі тверді частинки, що перевищують розмір 0,1 мкм. Дозволяє відсіювати великі забруднення металевої та неметалевої (у тому числі й органічної) природи;

- сіткою (металевою або з синтетичних матеріалів);

- представляють комплексну конструкцію, в яку може входити кілька шарів фільтрації – решітка з великими комірами, сітка зі стільниками середнього розміру і шар стільникової конструкції, що забезпечує відсівання найбільш дрібних частинок.

Для бар'єрних фільтрів тонкого очищення зазвичай використовують композиційні фільтруючі матеріали на основі целюлози, поліестеру та скловолна [1 – 3]. Такі матеріали забезпечують видалення частинок розміром більше за 2 - 5 мкм [4].

Для досягнення більш високих показників фільтрації в деяких сучасних фільтрах використовується особливий матеріал, комірки якого розташовані не рівномірно, а із зменшенням розміру від поверхні у глибину. Крупніші частинки затримуються у верхніх шарах, дрібніші – у глибоких [5]. Така внутрішня структура набагато продовжує строк експлуатації фільтруючих елементів.

Крім описаних вище бар'єрних фільтрів, відомо методи очищення, в яких для видалення з рідини частинок забруднень використовують дію полів різної природи – силові типи фільтрів на кшталт гофрованих та відцентрових.

Гофровані фільтри найбільш застосовують для видалення великих частинок однорідного розміру. Такі фільтри мають вигляд відповідним чином складених аркушів полімерів для фільтрації рідини. Складки в цих фільтрах забезпечують їм більшу площу поверхні, що дозволяє фільтрувати більше частинок забруднень за раз. Сучасні фільтри такого типу дозволяють видаляти частинки в 25 мкм. Але при несталої русі рідини, що важливо для стендів очищення, на таких фільтрах можливий підйом забруднення та його потрапляння в чистий потік мийної рідини.

Відцентрові фільтри відомі в біології для поділу наночастинок у біозразках [6]. Тим не менш, останніми роками ця технологія почала використовуватися для очищення технічних рідин. Прикладом може слугувати фільтр, в якому видалення забруднення відбувається за допомогою відцентрових сил, що виникають від обертання потоку, де забруднення виштовхуються на зовнішню частину фільтра і потрапляють на сітчастий екран, який видаляє їх з рідини [7]. Такі фільтри ефективні на достатньо широкому спектрі розмірів забруднення – від 1 мкм та вище [8, 9]. Вони запропоновані для приладів, що використовуються для очищення деталей машин [10].

Окремо варто відмітити про окремий клас високоефективних фільтрів, що показали свою високу ефективність у різних сферах застосування – НЕРА фільтри (від англійської High Efficiency Particulate Air) [11 – 15]. Хоч вони і призначені для фільтрації повітря, але цікавим є, в першу чергу, принцип їх роботи. Для частинок розміром більше 0,3 мкм фільтр НЕРА діє як сітка, вони не можуть пройти через її отвори. Волокна (зазвичай поліпропілену або скловолна) формують складні канали для руху потоку. Внаслідок цього дрібніші частинки, згідно з принципом броунівського

руху, не можуть встигати за рухом потоку і таким чином стикаються з волокнами, прилипаючи до них [16].

Стандартні НЕРА-фільтри виготовляються з волокон (зазвичай скловолокно), що мають високу проникність повітря, але не призначені для роботи з рідинами. Застосування такого методу для фільтрації рідин вкрай ускладнено через наступні причини:

- подібні НЕРА фільтри мають високий гідравлічний опір, що критично для рідини через значно більшу в'язкість;
- фільтруючий матеріал має бути стійким до компонентів миючої рідини, хімічно сумісним;
- необхідний постійний стабільний тиск потоку.

Таким чином незважаючи на високу ефективність, НЕРА-фільтри не можуть бути застосовані для рідких середовищ, але структурно подібні багаторівневі мікрофільтри (на основі полімерів, металів або кераміки) можуть бути цікавими варіантами для фільтрації миючих рідин, включаючи ті, що використовуються в машинах для очищення підшипників. Їх вибір залежить від необхідного ступеня очищення, типу забруднень та характеристик рідини.

Подібний підхід використовується в деяких існуючих фільтрах [17, 18], де в якості фільтруючого елемента використовуються спечений керамічний матеріал, або нержавіюча січена сітка, поліетилен. Зазначений склад зазвичай обраний для забезпечення матеріалу електричного заряду протилежного знака, ніж електричний заряд частинок забруднень, які необхідно видалити з вихідної рідини, причому спорідненість залежить від вихідної рН рідини. Матеріал розрахований на видалення частинок, розміром близько 5 мікрон і менше.

Також дещо подібними є так звані глибинні фільтри з волокнистою структурою, виготовлені спеціально для рідких середовищ (наприклад, поліпропіленові картриджі), які часто застосовуються в багатоступінчастих системах очищення олії, емульсій та миючих розчинів. Але всі вони також потребують достатньо високого постійного тиску для ефективного очищення.

Постановка завдань Традиційно застосовувані способи фільтрації та оновлення миючих рідин, такі як гравітаційне відстоювання, механічна фільтрація та часткова заміна, не забезпечують належного очищення в умовах інтенсивного промислового використання. Крім того, регулярна повна заміна рідини призводить до збільшення експлуатаційних витрат та обсягів відходів, що суперечить сучасним вимогам ресурсозбереження та екологічної безпеки. Тому, нами поставлено завдання дослідити комбіновані системи очищення, що поєднують фізико-хімічні та механічні методи фільтрації, адаптовані до специфіки забруднень, що виникають під час очищення підшипників.

Викладення основного матеріалу статті. Поставлене нами завдання виконаємо шляхом дослідження найбільш поширених сучасних методів та систем фільтрації у використовуваних в промисловості технологічних мийних машинах.

Розглянемо найбільш поширені сучасні методи фільтрації та їх складові.

Фільтрація в баку (попередня фільтрація). Багато машин для очищення деталей мають первинний фільтр, розташований у резервуарі, що містить мийну рідину. Це часто просте сітчасте сито або система перегородок, призначена для затримання забруднень найбільших розмірів до того, як вони потраплять у головний циркуляційний насос.

Цей етап захищає насос від пошкоджень та зменшує навантаження на етапи більш тонкої фільтрації.

Мийна рідина забирається з бака циркуляційним насосом і направляється через один або кілька корпусів фільтрів, які містять основні фільтрувальні елементи.

Використовуються різні типи фільтрувальних елементів залежно від розміру та природи забруднюючих речовин, які потрібно видалити. При цьому враховують вимоги до чистоти мийної рідини. Найбільш поширеними є наступні типи фільтрів.

Сітчасті фільтри. Вони виготовляються з плетеного дроту або синтетичної тканини. Ці фільтри затримують частинки, розмір яких перевищує розмір їхніх пор. Вони часто підлягають очищенню та повторному використанню. Для поетапної фільтрації можуть використовуватися сітки різного розміру, встановлені послідовно.

Мішкові фільтри. Ці фільтри складаються з пористого мішка, виготовленого з таких матеріалів, як вовна або ткане полотно. Рідина протікає через мішок, а частинки затримуються всередині. Мішкові фільтри мають більшу площу поверхні для фільтрації та підходять для видалення значної кількості твердих частинок. Зазвичай вони є одноразовими.

Картриджні фільтри. Це циліндричні фільтрувальні елементи, виготовлені з різних матеріалів, таких як намотані волокна, гофрований папір або розплавлений полімер. Вони забезпечують точне фільтрування (до дуже малих мікронних розмірів включно). Картриджні фільтри зазвичай є одноразовими.

Глибинні фільтри. Ці фільтри мають товсту пористу структуру, яка затримує частинки по всій товщині фільтрувального матеріалу, а не лише на поверхні. Вони ефективні для видалення широкого діапазону розмірів частинок і мають високу здатність до поглинання забруднень.

Магнітні сепаратори. Використовують для видалення феромагнітних, що містять залізо, частинок. Вони притягують і утримують металеві частинки, запобігаючи їх циркуляції в мийній рідині.

Після проходження через фільтрувальні елементи очищена мийна рідина повертається в мийну камеру або бак для повторної циркуляції.

Регулярне обслуговування системи фільтрації є критично важливим. Це включає очищення або заміну фільтрувальних елементів, коли вони засмічуються, для підтримки оптимальної швидкості потоку та ефективності фільтрації.

Деякі передові системи можуть включати автоматизовані цикли зворотного промивання або очищення для певних типів фільтрів.

Особливі підходи фільтрації мийної рідини використовують при очищенні мініатюрних шарикопідшипників. Їх можна класифікувати наступним чином.

1.Тонка фільтрація. Через малий розмір та високу точність мініатюрних шарикопідшипників їх очищення потребує більш тоншої фільтрації (для видалення найдрібніших частинок), що впливає на продуктивність. Цей процес може включати використання картриджних фільтрів з малими мікронними рейтингами або багатоступеневих систем фільтрації.

2.Сумісність матеріалів. Матеріали фільтрів повинні бути сумісними з використовуваними мийними рідинами, щоб запобігти їх деградації.

3.Керування швидкістю потоку. Система фільтрації повинна бути розроблена таким чином, щоб підтримувати адекватну швидкість потоку мийної рідини для забезпечення ефективного очищення без надмірного падіння тиску.

4.Компактний дизайн. Враховуючи часто невеликі габарити цих машин, система фільтрації повинна бути компактною та ефективно інтегрованою.

Наступним етапом дослідимо конструкції та принцип дії систем фільтрації мийного середовища в ультразвукових мийних машинах, використовуваних для очищення мініатюрних шарикопідшипників.

Принцип дії ультразвукових мийних машин, що використовуються для очищення мініатюрних шарикопідшипників, базується на явищі кавітації (генерується ультразвуковими хвилями). Це дозволяє ефективно видаляти забруднення, однак, щоб зберегти високу ефективність очищення та запобігти повторному забрудненню або пошкодженню делікатних підшипників, потрібно використовувати ефективну систему фільтрації. Задля підтримки необхідної чистоти робочої мийної рідини в умовах інтенсивного вивільнення частинок забруднення циркуляційна система складається з насоса для циркуляції, фільтри грубої та тонкої очистки, накопичувальні баки і опційно, системи сепарації масла. Оскільки ультразвук може емульгувати масло в розчині, його видалення є складним завданням. Проте, для підтримки ефективності розчину та запобігання повторному забрудненню, можуть використовуватися різні види фільтрів.

Тому модуль фільтрації 2 в розробленому та створеному пристрої безконтактного очищення мініатюрних шарикопідшипників (рис. 1) виконана багатоступінчастою та включає наступні елементи:

- циркуляційний насос, що забезпечує постійну циркуляцію мийного розчину між мийною ванною та системою фільтрації;
- фільтр грубої очистки (сітчастий фільтр), розташований безпосередньо на виході з мийної ванни. Він затримує відносно великі частинки, що відшарувалися (стружку, масляні грудки, пил), захищаючи наступні, більш тонкі фільтри. Розмір пор становить від 50 до 200 мкм.
- Фільтри тонкої очистки (картриджні або мішкові фільтри) – це основний етап фільтрації, призначений для видалення дрібних забруднень (частки пилу, оксидів, мікроскопічних абразивних частинок). Для мініатюрних підшипників часто використовуються фільтри з розміром пор від 1 до 10 мкм, а іноді й менше (до 0.45 мкм для високоточних застосувань). Матеріали можуть бути різні: поліпропілен, целюлоза, скловолокно.

- Накопичувальний бак для чистого та забрудненого розчину, що дозволяє проводити постійну фільтрацію.

Безпечне ефективне та надійне очищення мийної рідини з метою її повторного використання у пристрої застосовується циркуляційна система, при цьому відпрацьована (брудна) рідина з робочої ванни через зливний патрубок та трубопровід 8, самотливом надходить до розбірного контрольованого фільтру грубої очистки з прозорим резервуаром-відстійником (для заміни одноразового фільтруючого елемента) для попереднього очищення від механічних домішок (наприклад - мікростружки) та подавання в накопичувальний бак. Після чого рідина повторно фільтрується фільтром попереднього очищення та подається насосом під тиском через фільтр фінішного очищення та трубопровід 8 до робочої ванни, як очищена мийна рідина.

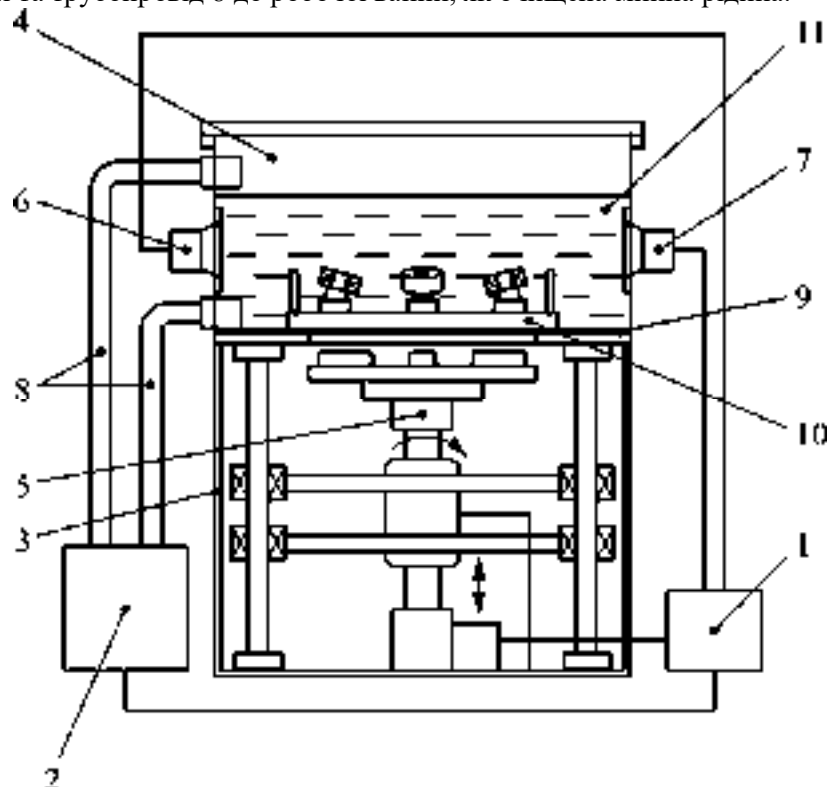


Рис. 1. Схема пристрою безконтактного очищення мініатюрних шарикопідшипників

На рис.1 цифрами позначені модуль електроживлення та керування 1, модуль зливу та фільтрації мийної рідини зі змінними механічними фільтрами 2, корпус приладу у вигляді рами 3, робоча ванна 4, система подачі та контролю величини імпульсного магнітного поля 5, ультразвукові випромінювачі 6 та 7, трубопроводи циркуляції мийної рідини 8, пластина 9 із немагнітнопроникного матеріалу (наприклад – із листового склопластика), ложементи 10 з мініатюрними шарикопідшипниками, що піддаються очищенню (виконуються під типорозмір шарикопідшипників, що очищуються), мийна рідина 11.

Використання комбінованого джерела імпульсного змінного магнітного та ультразвукового поля дозволяє ефективно видаляти забруднення з робочих поверхонь мініатюрних шарикопідшипників, що призводить до швидшого забруднення фільтруючих елементів у порівнянні з іншими типами мийних машин та пристроїв. Тому в циркуляційній системі очищення і фільтрації розробленого та створеного пристрою з урахуванням вищенаведеного аналізу до фільтрувальних елементів поставлено високі вимоги до чистоти, сумісності та стійкості до хімічного складу мийного розчину та робочої температури.

Повторні експериментальні дослідження видалених з відповідних фільтроелементів забруднення, виконано їх детальний аналіз середнього розміру, гранулометрію та визначено фазовий і хімічний склад. Для дослідження використано лазерний скануючий диференційно-фазовий мікроскоп-профілометр ЛСДФМП та растровий електронний мікроскоп з системою мікроаналізу хімічних елементів РЕМ-106И (рис. 1.2).

Дослідження розмірів та хімічного складу мікрочастинок забруднення, видалених шляхом фільтрації мийної рідини на створеній циркуляційній системі пристрою показали, що із тракту

кочення були вилучені мікрочастинки розмірами 30...50 мкм – 8 %; 10...30 мкм – 12 %; 1...10 мкм – 50 %, решта (30 %) – частинки розміром до 1 мкм.

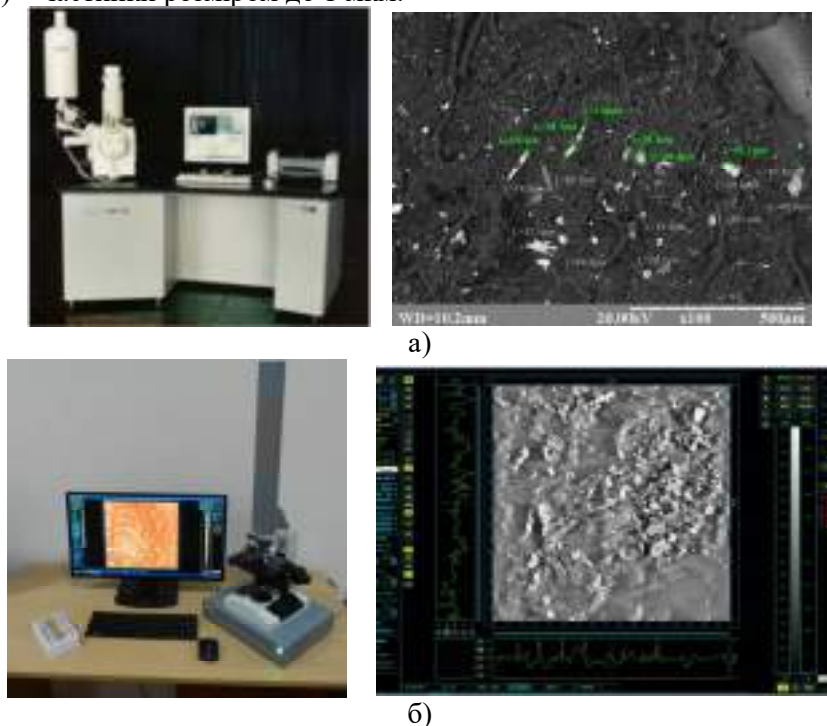


Рис. 1.2. Зовнішній вигляд лабораторних приладів та інтерфейсу програмного забезпечення з елементами дослідження вибраних забруднень:

а) електронний мікроскоп РЕМ-106 ІІ;

б) лазерний скануючий диференційно-фазовий мікроскоп-профілометр ЛСДФМП

Конструкція та схема управління пристрою дозволила, шляхом повторних експериментів порівняти ефективність методів очищення та визначити, що магнітно-турбулентний метод дозволяє більш ефективно видаляти мікрочастинки забруднення, розмір яких значно більше 1-2 мкм. Тоді як ультразвуковий метод навпаки показав найвищу ефективність на найдрібніших забрудненнях (субмікро та наночастинки).

Режим очищення відбувався в два етапи: перший етап – імпульсно-магнітно-турбулентне очищення підшипників з двох сторін, другий етап – ультразвукове очищення, також з двох сторін.

На рис. 1.3 приведено результати досліджень спектрального аналізу хімічного складу забруднень.

Значна кількість металічних фрагментів спостерігалась із великою відносною довжиною, що пояснюється особливостями магнітної взаємодії таких частинок. Серед цієї групи мають місце такі, чий склад співпадає зі складом матеріалів, із яких безпосередньо виготовлені елементи конструкції (сталь ШХ15 – тіла кочення та обойми, бронза або латунь – сепаратори), і такі, що не пов'язані безпосередньо з конструкцією досліджуваних прецизійних трибосистем кочення.

Неферромагнітні частки, в основному, представлені абразивними матеріалами, зокрема такими як карбід та оксид кремнію. Значна частина неметалічних забруднень складена фрагментами полімеризованих пально-мастильних матеріалів, котрі є залишками консерваційного матеріалу.

Аналітична обробка отриманих результатів дала змогу визначити гранулометричний склад видалених часток забруднень, що дозволяє зробити висновок про необхідність використання комплексних багатоступінчастих методів очищення миючої рідини для проведення гарантованого та ефективного очищення мініатюрних шарикопідшипників і прецизійних деталей вузлів тертя ультразвуковими та імпульсно-магнітними полями як фінішної передексплуатаційної обробки.

Висновки

1. На основі проведеного аналізу сучасних систем фільтрації та використовуваних фільтрувальних елементів виконано їх класифікацію за областю використання та ступенем ефективності.

2. Для забезпечення ефективності процесу очищення підшипників кочення запропоновано використання комбінованих технологічних приладів для видалення різного роду забруднень з

робочих поверхонь та трактів кочення підшипників, оснащених багатоступеневими системами фільтрації миючої рідини.

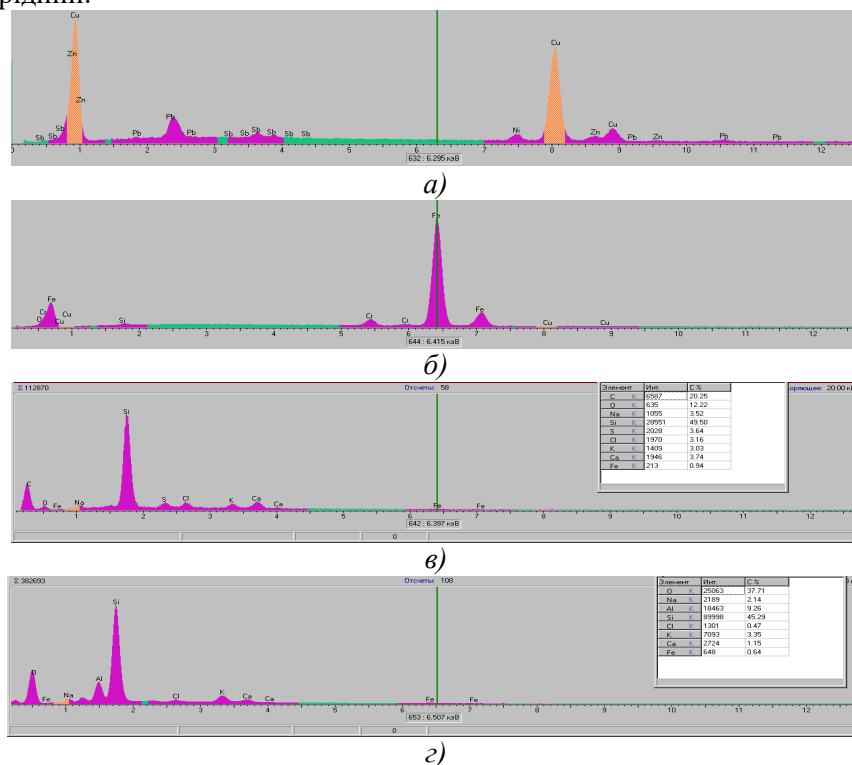


Рис. 1.3. Спектральний аналіз хімічного складу забруднень: а) мідний сплав; б) сталева стружка; в), г) неметалеві забруднення

3. Досліджено хімічний та фазовий склад відфільтрованих забруднень. На основі цього запропоновано використовувати комбіновані операції очищення ультразвуковими та імпульсно-магнітними полями як фінішні операції передексплуатаційної обробки підшипників, з метою підвищення їх надійності та ресурсу.

Список використаних джерел

1. Xu, Study of the ptfe multi-tube high efficiency air filter for indoor air purification, Process Saf Environ, № 151, с. 28 DOI: [10.1016/j.psep.2021.05.007](https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.05.007).
2. Long, Dust loading performance of a novel submicro-fiber composite filter medium for engine, Materials (Basel), № 11, с. 2038 DOI: [10.3390/ma11102038](https://doi.org/10.3390/ma11102038).
3. Dziubak, Material properties analysis with addition of nanofibres for air intake filtration in internal combustion engines, Int. J. Automo Mech. E, № 18, с. 8621 DOI: [10.15282/ijame.18.1.2021.21.0656](https://doi.org/10.15282/ijame.18.1.2021.21.0656).
4. Yifan Wang, Tianyi Zhang, Lei Chen, Wenquan Tao Multi-objective optimization of laser perforated fuel filter parameters based on artificial neural network and genetic algorithm Particuology Volume 96, January 2025, Pages 57-70 <https://doi.org/10.1016/j.partic.2024.10.016>.
5. Chengwei Xu, Zhenyan Lu, Yan Yu, Lirong Li A coalescing filter with hybrid structure of oleophilic/oleophobic media by centrifugal spinning. Separation and Purification Technology Volume 359, Part 1, 22 June 2025, 130512 <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.130512>.
6. Elin Johnsen, Ole Kristian Brandtzaeg, Tore Vehus, Hanne Roberg-Larsen, Vanya Bogoeva, Ornela Ademi, Jon Hildahl, Elsa Lundanes, Steven Ray Wilson A critical evaluation of Amicon Ultra centrifugal filters for separating proteins, drugs and nanoparticles in biosamples Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis Volume 120, 20 February 2016, Pages 106-111 <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2015.12.010>.
7. Damla Serper, Kevin J. Hanley, Pekka Oinas Computationally efficient DEM simulation of a basket-type centrifugal filter using a novel switchable contact model Powder Technology Volume 452, 28 February 2025, 120467 <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.120467>.
8. Maksym Loginov, Franco Samper, Geneviève Gésan-Guiziou, Titus Sobisch, Dietmar Lerche, Eugene Vorobiev Centrifugal ultrafiltration for determination of filter cake properties of colloids. Journal

of Membrane Science, Volume 536, 15 August 2017, Pages 59-75
<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.04.064>.

9. Vítor Geraldes, Patrícia Henriques, Maria Diná Afonso, Ana Maria Alves, Rita F. Pires, Mónica Faria, Bart Van der Bruggen, Miguel Rodrigues Designing Centrifugal Membrane Filters with uniform-pressure for UF/NF/RO separations Journal of Membrane Science Volume 702, May 2024, 122752
<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2024.122752>.

10. Патент US8037892B2 Parts washing apparatus with centrifugal filter, 2007
<https://patents.google.com/patent/US8037892B2/en>.

11. Henry C. Burridge, Sen Liu, Sara Mohamed, Samuel G.A. Wood, Cath J. Noakes Coupled indoor air quality and dynamic thermal modelling to assess the potential impacts of standalone HEPA filter units in classrooms, Indoor Environments, Volume 1, Issue 3, October 2024, 100034
<https://doi.org/10.1016/j.indenv.2024.100034>.

12. Sopanat Sawatdee, Atcharaporn Botalo, Tanissara Noinonmueng, Pattaraporn Posoknistakul, Panich Intra, Pisut Pongchaikul, Boonya Charnnok, Narong Chanlek, Navadol Laosiripojana, Kevin C.W. Wu, Chularat Sakdaronnarong Fabrication of multilayer cellulose filters isolated from natural biomass for highly efficient air filtration for replacement of synthetic HEPA filters, Process Safety and Environmental Protection Volume 194, February 2025, Pages 216-230
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.12.007>.

13. Hee Kwon Ku, Min-Ho Lee, Hyunjin Boo, Geun-Dong Song, Deokhee Lee, Kaphyun Yoo, Byung Gi Park Performance assessment of HEPA filter to reduce internal dose against radioactive aerosol in nuclear decommissioning Nuclear Engineering and Technology Volume 55, Issue 5, May 2023, Pages 1830-1837
<https://doi.org/10.1016/j.net.2023.01.016>.

14. Xin Zhang, Junjie Liu Operating resistance prediction of non-flat HEPA filters Powder Technology Volume 408, August 2022, 117718
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117718>.

15. Claus Schweinheim (Division Manager) Setting standards for HEPA filter efficiency Filtration + Separation Volume 52, Issue 3, May-June 2015, Pages 13-15
[https://doi.org/10.1016/S0015-1882\(15\)30132-4](https://doi.org/10.1016/S0015-1882(15)30132-4).

16. Perry J.L., Agui J.H., Vijayakumar R. Submicron and Nanoparticulate Matter Removal by HEPA-Rated Media Filters and Packed Beds of Granular Materials. NASA/TM-2016-218224

17. Патент CA2284964A1 <https://patents.google.com/patent/CA2284964A1/en>.

18. US6054059A 2000-04-25 Use of a ceramic metal oxide filter whose selection depends upon the Ph of the feed liquid and subsequent backwash using a liquid having a different Ph.

V.I. Осипенко, М.В. Хандюк, Л.М. Мізнік, Л. Д. Мисник

ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ОБСМАЖЕНОГО ТА ПРОТЕРТОГО НАПІВФАБРИКАТУ З РІПЧАСТОЇ ЦИБУЛІ

Черкаський державний технологічний університет

В роботі представлено результати досліджень технологічного процесу та обґрунтування прийнятих заходів по удосконаленню лінії виробництва обсмаженого та протертого напівфабрикату з ріпчастої цибулі. Аналіз роботи даної лінії на Черкаському виробничому підрозділі товариства з обмеженою відповідальністю «Віджи Продажин» групи компаній «Верес» дозволив виявити ряд суттєвих недоліків в її роботі. За результатами аналізу було обґрунтовано, розроблено та впроваджено удосконалену лінію з суттєво покращеними технічними характеристиками.

Ключові слова: ріпчаста цибуля, процес чищення, продуктивність, обсмаження, теплоносії, протирання, ікра.

V.I. Osypenko, M.V. Khandyuk, L.M. Miznik, L. D. Mysnyk

TECHNOLOGICAL ASPECTS OF IMPROVING THE EFFICIENCY OF MANUFACTURING ROASTED AND GRATED SEMI-FINISHED PRODUCTS FROM ONIONS

The paper presents the research results on the technological process and justification of measures taken to improve the production line for roasted and grated semi-finished products from onions. Analysis of the operation of this line at the Cherkasy production unit of the limited liability company "Vidzi Production" of the "Veres" group of companies revealed a number of significant shortcomings in its operation. Based on the results of the analysis, an improved line with significantly enhanced technical characteristics was substantiated, developed, and implemented. The improvement in characteristics was achieved through the introduction of more efficient roasting ovens, root cutting machines, and cleaning machines.

Keywords: onion, peeling process, productivity, frying, heat carrier, grating, caviar.

Statement of the problem.

The food industry in Ukraine has traditionally been one of the main and most important sectors of the agro-industrial complex (AIC). The canning industry is one of the main branches of the food industry, which makes it possible to reduce the time spent on cooking at home, diversify the public catering diet, and provide the population with products made from raw materials that grow only during a certain period of the year. The products of the canning industry make it possible to provide highly vitaminized nutrition. When properly processed and refined, they not only retain their nutritional qualities for a long time, but also improve them. One of the main tasks of canning is to reduce the activity of the external environment and water, and to destroy or suppress the action and development of microorganisms and their spores. Various canning methods are used to preserve the nutritional value of food products [1].

The Ukrainian canning industry needs radical modernization through the introduction of modern technological equipment. Such equipment should be based on advanced engineering solutions that will increase productivity, ensure environmentally friendly production, and make efficient use of resources. Practical experience confirms that the most effective areas for capital investment in the food industry are the reconstruction and technical re-equipment of existing production facilities. This approach allows for the renewal of the material and technical base in a significantly shorter time frame and the development of new capacities at a lower financial cost compared to the construction of new facilities.

Given these challenges, this study aims to improve the quality of roasted and grated semi-finished onion products, which are an important ingredient in the production of eggplant and zucchini caviar at canning factories.

Analysis of recent studies and publications. The problem of improving nutrition has prompted innovative research by many scientists, in particular M. Bomba and S. Kolodiy assessed the possibility of adapting high-calorie traditional domestic dishes to the requirements of dietary nutrition in connection with the deterioration of the population's health [2]. It should be noted that V. Ivanchenkov and Z. Chekhovich considered the issue of promoting healthy eating through the prism of innovation and stable economic development of Ukrainian enterprises [3]. N. Dudenko and V. Olkhovska were engaged in the development of vegetable caviar with increased nutritional value [4]. The most popular is zucchini caviar. It contains zucchini, 25% tomato paste, carrots, onions, sugar, table salt, oil, ground red pepper, and ground black pepper. The problems of mechanization of canning industry equipment, in particular the cleaning and separation of edible and inedible parts of raw materials, and the heat treatment of plant products, have been studied in the works of the following domestic and foreign scientists: M. Aminov, A. Gladushnyak, M. Dikis, I. Kolesnik, E. Kovalenko, A. Malsky, Yu. Skrynnikov, N. Feshchenko, V. Voroshchuk, M. Shynkarik, O. Datsyshyn, G. Goncharenko, and others [5]. However, despite the significant amount of work

done, many components of zucchini caviar production lines do not fully meet modern requirements in terms of their technical and technological characteristics. Taking this into account, the analysis of technological processes and the improvement of the components of the production line for fried and grated semi-finished products from onions based on this analysis ensures more efficient and higher-quality production of semi-finished products for zucchini and eggplant caviar.

Purpose of the article. Based on the analysis of the parameters of the existing technological process, improve the production line for roasted and grated semi-finished products from onions in order to increase the efficiency of manufacturing a high-quality product, which is an important component of canned zucchini caviar and eggplant caviar.

The main material.

Today, the following trends and priorities have emerged worldwide: further growth in agricultural raw material yields, development of animal husbandry, expansion of product range, improvement of quality, nutritional value, and taste characteristics of food products, introduction of competitive and cost-effective technologies, reduction of the technological cycle and intensification of technological operations, rational use of primary and secondary raw materials. The implementation of these directions is possible only through the analysis of modern methods of technological impact on food products and the selection of the optimal organization of the technological flow [6].

Fruits and vegetables are an indispensable source of easily digestible carbohydrates and physiologically active substances (vitamins, polyphenols, mineral compounds, natural antioxidants, and dietary fiber). The medicinal properties of many types of fruits, vegetables, and berries have been known since ancient times. However, their shelf life is limited, and as it increases, losses in weight and quality increase, as do storage costs. The purpose of canning is to convert raw materials that are unstable during storage into products with a long shelf life. The production of canned foods significantly reduces the loss of agricultural raw materials, ensures a year-round supply of a wide range of fruit and vegetable products to the population, and reduces the labor and time required for food preparation, army rations, and food in extreme conditions (during long expeditions). Depending on the initial raw materials and the quality requirements for the expected product, a technological scheme for processing or canning is selected. There are many ways to preserve fruit and vegetable products – drying, cooling, freezing, preserving with salt, sugar, acids, etc. The most reliable method is to store products in airtight containers using heat treatment (sterilization or pasteurization) [6].

Vegetable caviar is a cold appetizer, usually in the form of a salad, made from ground vegetables or mushrooms. Among canned vegetables, zucchini caviar is the most popular. To prepare caviar, fried, mashed semi-finished products are used, made from zucchini, eggplant, carrots, and onions. Tomato paste, oil, salt, sugar, pepper, and garlic are also added to make vegetable caviar. Spices such as paprika, coriander, bay leaves, and vinegar for preservation may also be added.

For the production of semi-finished products, assembly lines are used, which are located in the preparation department of the vegetable caviar production workshop.

The line for preparing onion semi-finished products for the production of vegetable caviar (zucchini and eggplant) at the private enterprise Vidzhi Production LLC, which is part of the Veres group of companies (GC), is shown in Fig. 1.

The line operates as follows: onions are delivered to the vegetable caviar production workshop in nylon nets and loaded into a calibration machine 1, where they are sorted into three size fractions, which are then conveyed via trays to three belt conveyors 2. The belt conveyors feed the onions to the onion end trimming device 3, which then feeds them to the cleaning machines 4. The cleaned onions are fed to the inspection conveyor 5, where workers select unpeeled onions and return them to the cleaning machines. The cleaned onions are fed to a washing machine 6 and then to a shredding machine 7. An elevator 8 feeds the chopped onions into a roasting oven 9. A screw conveyor 10 feeds the roasted onions into a grinding machine 11 and then into a grating machine with a collection container 12. Grated onion (semi-finished onion product) from a collection container is fed by a screw pump 13 into a device for mixing vegetable caviar components (grated semi-finished products: zucchini or eggplant; carrots; onions; tomato paste; sugar; salt; sunflower oil; spices) and is fed into the apparatus for mixing vegetable caviar components.

The recording and analysis of the operation of each component of this line revealed a number of shortcomings that significantly limit the line's productivity. Namely:

- low productivity of onion trimming devices and high dependence on operator skill;
- unstable quality and low productivity of the oven for roasting onions;
- unreliability and low quality of peeled onions from onion peeling machines;

- manual collection of waste from cutting ends and peeling onions into containers;
- a large number of operators and auxiliary workers (14 people).

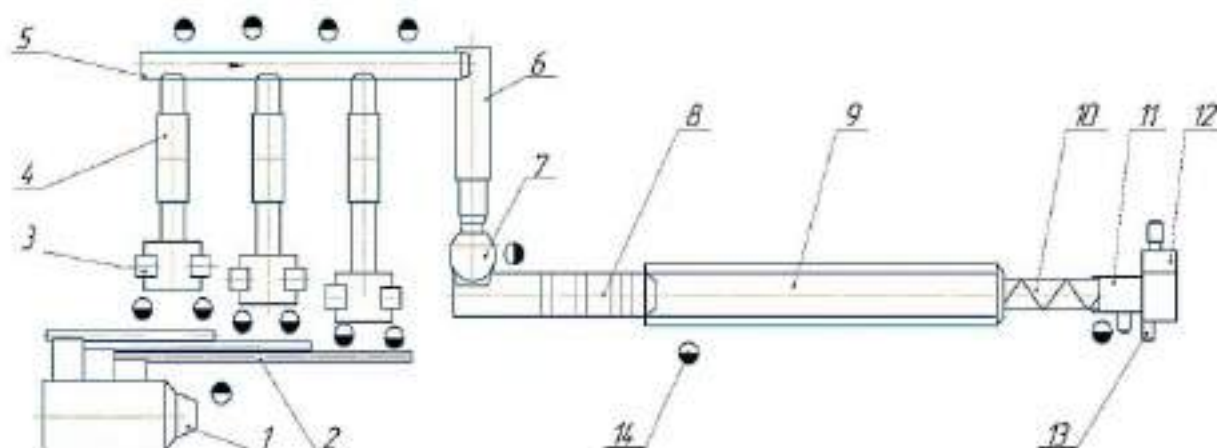


Fig. 1. Structural diagram of the onion semi-finished product preparation line at the private enterprise Vidzhi Production LLC, Veres Group

1 – calibration machine; 2 – belt conveyors; 3 – onion end trimming devices; 4 – onion cleaning machine; 5 – inspection conveyor; 6 – washing machine; 7 – shredding machine; 8 – elevator; 9 – roasting oven; 10 – screw conveyor; 11 – grinding machine; 12 – grating machine with collection container; 13 – screw pump; 14 – operator

Eliminating the identified deficiencies requires determining the necessary technical characteristics of the equipment to be replaced and, accordingly, developing, manufacturing, or purchasing such equipment. The key machine in the production line is the oven for roasting onions. It is this machine that provides the productivity necessary for the effective implementation of the technological process of producing zucchini or eggplant caviar. The necessary technical characteristics developed for the design of an improved oven are given in Table 1.

Table 1

Justified technical characteristics of the oven for roasting onions

Characteristics	Indicators
Productivity, kg/hour	1000
Heating surface, m ²	22
Average amount of oil in the furnace, kg	450
Steam consumption at pressure, 1÷2 MPa	720
Roasting duration, min	5,22
Belt speed, m/s	0,05÷ 0,2
Water consumption entering the cooler, m ³ /hour	1
Daily productivity coefficient (calculated) when frying zucchini	2
Daily productivity coefficient (calculated) when frying eggplants	0,6
Pressure tank capacity, m ³	0,8
Filter tank volume, m ³	0,8
Calculated power of electric motors, kW	3.35
Overall dimensions:	
length, mm	5200
width, mm	1800
height, mm	2210
Weight, kg	61001,1

In accordance with the specified technical characteristics, designers at Veres Group developed design documentation, and an improved furnace was manufactured in the Group's mechanical workshops (Fig. 2).

In this oven, vegetables are fried using an intermediate heat transfer medium that comes into contact with the product, which is vegetable fat (sunflower oil). In turn, the oil is heated by steam.

Processing is carried out at a relatively high temperature of 120°C to 160°C. Under the influence of

heat, a number of interrelated physical and physicochemical processes take place in the product, resulting in the removal of part of the moisture, absorption of oil, volume shrinkage of the product, gas release, increased pressure inside the samples, increased porosity, and changes in the density and heat capacity of the product. The speed of the processes occurring in the product depends on the shape and size of the product pieces, the temperature of the oil, the conditions of heat exchange between the oil and the product, and a number of other factors.



Fig. 2. Improved oven for roasting onions at the ChVZ LLC “Vidzi Production” of the Veres Group

Based on the results of the production line analysis, it was decided to replace the washing machine equipment and mechanize the removal of onion cleaning waste (stems, rhizomes, husks, and other foreign impurities). To this end, a machine for cutting onion ends and a machine for peeling onions were developed, and various standard and non-standard transport and buffer (auxiliary) equipment was used.

A machine with new design solutions was developed for trimming the rhizomes and stems of onions, which increases the machine's productivity, improves the quality of onion end trimming, and reduces waste [5, 7]. The technical characteristics are presented in Table 2.

Table 2

Justified technical characteristics of a machine for cutting the roots and stems of onions

Specifications	Indicators
Productivity, kg/hour	500
Number of carousels, pcs	2
Number of heads on the carousel	12
Average onion weight, kg	0,06 – 0,075
Machine productivity, pcs/min	120
Number of carousel revolutions, min ⁻¹	6
Type of traction chain for onion carriers	ПП-38,1
Electric motor power, kW	1,1

A machine with new design solutions was developed for peeling onions from husks. The machine can be successfully used in lines for preparing fried and grated semi-finished products from onions in the preparatory departments for processing raw materials at canning factories. Based on the calculation of design and kinematic parameters, the technical characteristics of the developed machine for peeling onions from husks are given in Table 3.

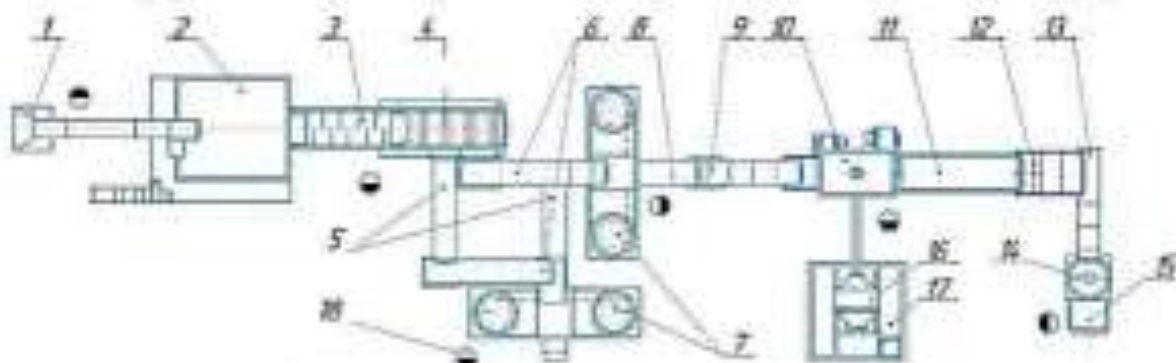
The structural diagram of the modernized production line is shown in Fig. 3. The modernized production line for semi-finished products from onions works as follows: onions are delivered to the vegetable caviar production workshop in nylon nets, loaded by elevator 1, and fed into hopper 2. From the hopper, elevator 3 feeds the onions into the calibrating machine 4, where they are separated into two

fractions according to size. From the calibrating machine, belt conveyors 5 and elevators 6 feed the onions to the onion end trimming machines 7. Then, the onions are fed by belt conveyors 8 and elevator 9 to the cleaning machine 10. The cleaned onions are fed to the inspection conveyor 11, where workers select uncleaned onions and return them to the cleaning machine. The cleaned onions are fed into a washing machine 12 and elevators 13, and then into a shredding machine 14.

Table 3

Justified technical characteristics of a machine for cleaning onions from husks

Specifications	Indicators
Productivity, kg/hour	1000
Number of screw revolutions, min^{-1}	3,2
Translational velocity of onion, m/s	0,02
Average onion weight, kg	0,06 – 0,075
Screw drive power, kW	0,18
Type of gear motor	NMRV050
Power of the abrasive roll drive, kW	1,1
Type of gear motor	MI2C-63-71-1,1
Type of drive chain for screw drive	IP-19,05-3780



1 – elevator; 2 – hopper; 3 – elevator; 4 – calibration machine; 5 – belt conveyors; 6 – elevators; 7 – onion trimming machines; 8 – belt conveyor; 9 – elevator; 10 – onion cleaning machine; 11 – inspection conveyor; 12 – washing machine; 13 – elevator; 14 – shredding machine; 15 – belt conveyor; 16 – fan; 17 – hopper; 18 – operator

Fig. 3. Structural diagram of the modernized production line for semi-finished onion products at the private enterprise Vidzhi Production LLC, Veres Group

The rest of the semi-finished product manufacturing process is the same as before the reconstruction. The chopped onions are fed by a conveyor to a new roasting oven, and the roasted onions are fed by a screw conveyor to a crusher and then to a grinding machine with a collector. The grated onions (semi-finished onion product) are fed from the collection container by a screw pump into the vegetable caviar mixing machine (grated semi-finished products: zucchini, pumpkin or eggplant, carrots, onions; tomato paste; sugar; salt; sunflower oil; spices). The husks from the onion cleaning machine 10 are fed by fan 16 into hopper 17.

Thanks to the introduction of the modernized line, the number of operators and auxiliary workers on the line has been reduced from 14 to 9 people.

Conclusions.

1. Based on the results of a detailed analysis of the parameters of the existing technological process for preparing semi-finished onion products for the production of vegetable caviar (zucchini and eggplant) at the private enterprise Vidzhi Production LLC, a number of shortcomings were identified that significantly limited the productivity and efficiency of the line.

2. To eliminate the identified shortcomings, the technical characteristics of the oven for roasting onions, the machine for cutting the roots and stems of onions, and improvements were made to the production line for roasted and grated onion semi-finished products.

3. The modernized production line for onion semi-finished products at the private enterprise of Vidzhi Production LLC of the Veres Group using newly developed machines with proven technical characteristics,

which has increased process productivity, ensured more stable product quality, and reduced the number of employees.

References:

1 Canning industry: traditions and innovations. Domestic and international experience: scientific and reference bibliography / [compiled by O.V. Olabodi]; National University of Food Technologies, Scientific and Technical Library. Kyiv, 2020. 265 p. URL: <https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/31603>.

2 Processes and equipment. Mechanical and Hydromechanical Processes: Textbook / V.S. Boiko, K.O. Samoichuk, V.G. Tarasenko, V.O. Verkholtantseva, N.O. Palianychka, E.V. Mikhailov, O.O. Chervotkina. Melitopol, 2021. 445 p. URL: <http://elar.tsatu.edu.ua/handle/123456789/14736>.

3 Cherevko O.I., Poperechny A.M. Processes and equipment in food production: textbook, 2nd edition, supplemented and revised. Kharkiv: Svit Knyh, 2014. 495 p. URL: https://vpusp.vn.ua/wp-content/uploads/2023/01/cherevko_poperechnyy_protsey_i_aparaty_kharchovykh_vyrobnystv.pdf.

4 Dudenko N.V., Olkhovskaya V.S. Mathematical modeling of canned vegetables with specified consumer properties. Bulletin of NTU "KhPI." Series: New solutions in modern technologies. 2013. No. 1 (977). Pp. 116–122.

5. Khandyuk M.V. Improvement of the machine for cutting the ends of onions / M.V. Khandyuk // Innovative aspects of the development of equipment for the food and hotel industry in modern conditions: International scientific and practical conference (Kharkiv – Melitopol – Kyrylivka, September 8-11, 2015 [abstracts]). – Kharkiv: KSUFT, 2015. – Part 4. – P. 196-197.

6 Gnitskevich V.A., Nikiforov R.P., Slasheva A.V. G 56 Food technologies. Technology of plant-based products [Text]: textbook. – Kryvyi Rih: DonNUET, 2021. – 267 p.

7 Khandyuk M.V. New design of a machine for cutting the ends of onions. Collection of scientific works of Vinnytsia National Agrarian University. Series: Technical Sciences. Issue 1 (89). Vol. 1. Vinnytsia: 2015. P. 62-67.

М. М. Толстушко¹, Н. О. Ференц², Ю. Е. Павлюк², І. П. Кравець², А. С. Лин²

¹Луцький національний технічний університет

²Львівський державний університет безпеки життєдіяльності

АНАЛІЗ ВИБУХОПОЖЕЖОНЕБЕЗПЕКИ ВИДОБУВАННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

У статті підкреслено, що проблема забезпечення газодобування є актуальною і потребує впровадження сучасних технологій захисту. Проаналізовано утворення вибухопожежонебезпечного середовища у буровій установці. Зазначено, що в Правилах безпеки в нафтогазодобувній промисловості вказано лише про категоризацію приміщень, а про категоризацію зовнішніх установок відсутня будь-яка інформація. Встановлено, що вказані зовнішні установки належать до категорій *A_z* (вибухопожежонебезпечна) та *B_z* (пожежонебезпечна). Запропоновано внести зміни у Правила безпеки в нафтогазодобувній промисловості про необхідність категоризації зовнішніх установок, а на об'єктах видобутку природного газу визначити категорії за вибухопожежною небезпечністю для газових свердловин, бурових установок, мобільних компресорних станцій, факельних систем та інших об'єктів, пов'язаних з експлуатацією об'єктів газодобування.

Ключові слова: вибухопожежонебезпека, природний газ, видобуток, категорія, зовнішня установка.

M. Tolstushko, N. Ferents, YU. Paviuk, I. Kravets, A. Lun

EXPLOSION AND FIRE HAZARD ANALYSIS OF NATURAL GAS EXTRACTION

The article emphasizes that the problem of securing gas production is relevant and requires the implementation of modern protection technologies. The formation of an explosive and fire-hazardous environment in a drilling rig is analyzed. It is noted that the Safety Rules in the Oil and Gas Industry indicate only the categorization of premises, and there is no information about the categorization of external installations. It is established that the specified external installations belong to categories *A_z* (explosive and fire-hazardous) and *B_z* (fire-hazardous). It is proposed to make changes to the Safety Rules in the Oil and Gas Industry on the need to categorize external installations, and at natural gas production facilities to determine categories for explosion and fire hazard for gas wells, drilling rigs, mobile compressor stations, flare systems and other facilities related to the operation of gas production facilities.

Keywords: explosion and fire safety, natural gas, extraction, category, external installation.

Постановка проблеми.

Видобуток природного газу в Україні ведеться здавна. Початком промислового використання природного газу на території Галичини вважають 1896 р., коли газ із нафтових свердловин на родовищі Східниця по трубах перевели до топки парового котла [1]. Перший газопереробний завод у Європі був збудований у Бориславі в 1911 р., а згодом тут було збудовано ще дев'ять заводів. У 1912 р. у Бориславі було побудовано перший в Україні газопровід протяжністю 700 м і два газопроводи від Борислава до Дрогобича довжиною 12 км кожен. Ці газопроводи входили в десятку перших протяжних газопроводів Європи. У 1921 р. пошуковою свердловиною фірми «Gazolina» на глибині 395 м було розкрито перший газовий поклад Дашавського родовища. Розвідування Дашавської газоносної площі у 1924 році підтвердило відкриття родовища природного газу, початкові запаси якого становили 13,2 млрд. м³. У 1950 р. було відкрите унікальне Шебелинське газоконденсатне родовище в Харківській області – найбільше на той час у Європі [1].

Видобуток газу в Україні не припиняється і під час війни. Зокрема, впродовж 2023 року було введено в експлуатацію 86 нових бурових свердловин, з них 24 – з початковим дебітом більше 100000 м³, що стало абсолютним рекордом за 20 останніх років. Найпотужнішу бурову свердловину запущено в квітні 2023 року, її дебіт досягає 580 000 м³ [2].

Аналіз пожеж свідчить, що найчастіше вони виникають під час буріння свердловин і при їх експлуатації та призводять до значних матеріальних і трудових витрат на їх ліквідацію. Одна із найбільших пожеж сталася на території Угерського газового родовища у листопаді 1946 року [3]. Вона тривала впродовж року і за цей час втрати газу склали 3 млрд. м³ – це 10% природних запасів Угерського родовища. Через аномально високий пластовий тиск газу і помилку бурової бригади під час спуско-підйомної операції стався раптовий викид газу. Тиск газу зірвав превентор з гирла свердловини і за лічені секунди викинув 800-метрову колону шестидюймових бурильних труб. Через тертя бурильних труб об бурову вишку газ загорівся. Стовп вогню сягав 30 м заввишки, а вночі заграву було видно аж зі Львова. Палаючий газ, викиди величезної кількості води разом з породою не давали тривалий час загасити пожежу і затампувати свердловину. Для ліквідації фонтану у 1947 році було пробурено дві похилі свердловини за 200 м від аварійної, і лише після введення цих свердловин в експлуатацію факел загасили. На його місці утворилася воронка у формі чаші глибиною 40 м, яку згодом наповнили ґрунтові води.

Тому вкрай важливо забезпечити процес видобутку природного газу на всіх стадіях технологічного процесу: від проектування, буріння, спорудження, експлуатації свердловини до підготовки газу для транспортування його магістральними трубопроводами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Аналітичний огляд досліджень та публікацій показує, що Україна володіє достатніми природними ресурсами, науково-технічним і кадровим потенціалом та фінансовими резервами для забезпечення себе природним газом власного видобутку [5]. Автор стверджує, що головним напрямом стрімкого зростання національного нафтогазовидобутку є зростання річних обсягів пошуково-розвідувального буріння до 600 тис. м³, а експлуатаційного – до 400 тис. м³. Для реалізації таких планів необхідний високий рівень наукових досліджень, розробок та виготовлення обладнання, інструментів, матеріалів, підготовка кадрів та впровадження сучасних технологій.

Однак, на думку авторів [6] найбільш небезпечними викликами для газової галузі є відставання розвитку вітчизняного газового ринку від активних процесів реформування світових газових ринків, насамперед, у Європі; необхідність виконання зобов'язань України, що випливають з її членства в енергетичному співтоваристві, та зафіксовані іншими міжнародними зобов'язаннями України.

Дослідники [7] підкреслюють, що велика кількість газових родовищ України значною мірою виснажена, окремі з них перебувають на завершальній стадії видобутку газу. Однак, виснажені родовища природних газів ще мають значні залишкові запаси вуглеводнів – у пласті може залишатися до 10-15 % газу від початкових запасів. Авторами досліджено технологію витіснення залишкового природного газу з пористого середовища нагнітанням азоту. Вказана технологія – важливий напрям для забезпечення видобутку природного газу, оскільки, азот є ефективним флегматизатором.

Автори [8] вважають причинним фактором аварій у нафтогазовидобувній промисловості порушення правил і процедур безпеки. Дослідниками [9] розроблено математичні моделі з метою оптимізації заходів безпеки на газодобувній свердловині. Авторами використовувалася лексикографічна функція для встановлення пріоритетів цільових функцій, а генетичний алгоритм – для знаходження набору оптимальних рішень Парето.

У роботах [10, 11] розглянуто деякі аспекти для підвищення вибухопожежонебезпеки процесу видобутку природного газу, наукове обґрунтування яких розглядається у даній роботі. Таким чином, проблема забезпечення газодобування є актуальною і потребує впровадження сучасних технологій захисту.

Постановка завдань. Мета роботи полягає в оцінці вибухопожежонебезпеки видобутку природного газу. Для досягнення мети застосовано такі методи, як історичний, порівняльний, статистичний, теоретичного узагальнення, абстрактно-логічний, аналізу і синтезу, а також методики розрахунку згідно ДСТУ Б В.1.1-36:2016 [4].

Викладення основного матеріалу.

На об'єктах видобутку природного газу, розташовані виробничі, складські та адміністративно-побутові будинки, споруди, зовнішні установки і підземні комунікації. Зовнішніми вважають установки, апарати і устаткування яких розміщені зовні будинку на одному технологічному майданчику і пов'язані між собою єдиним технологічним процесом виробництва, транспортування та переробки продукції.

До зовнішніх установок на об'єктах газодобування відносять: газові свердловини, бурові установки, майданчики для розташування обладнання, мобільні компресорні станції, факельні системи та інші об'єкти, пов'язані з експлуатацією об'єктів газовидобутку.

У таких установках безперервно чи періодично знаходиться вибухопожежонебезпечна речовина – природний газ. Зовнішня установка – факельна система використовується для викидання і подальшого спалювання горючого газу під час аварійних ситуацій у процесі збору, підготовки та компримування газу, у випадку зупинки об'єктів газовидобутку, а також при періодичному викиданні природного газу і продуванні технологічного обладнання.

Зовнішньою установкою вважають і мобільну компресорну станцію – пересувний комплекс споруд, обладнання та устаткування, призначений для запобігання викиду газу в довкілля шляхом його перекачування при проведенні ремонтних і регламентних робіт на об'єктах газодобування. Маса газу, яка може надійти при аварії, залежить від продуктивності компресорів, тривалості перекривання засувки, розмірів трубопроводів.

У буровій установці знаходиться комплекс бурового обладнання і споруд для буріння свердловин, де в процесі буріння можливі неконтрольовані газопрояви. При незначній кількості газопрояви не перешкоджають проведенню основних технологічних операцій, але великі аварійні викиди супроводжується утворенням вибухопожежонебезпечного середовища. Причинами великих аварійних викидів газу із свердловини на стадії буріння є відсутність, несправність чи неправильне використання превенторів на гирлі свердловин, а також порушення герметичності обсадних колон. Викиди газу виникають в обсадних колонах при відсутності у свердловині бурильних труб; у колонах бурильних труб при відсутності або несправності зворотного клапана; у кільцевому просторі між бурильною і обсадною колонами; у нещільностях роз'ємних з'єднань обв'язки гирла свердловини; у кільцевих щілинах між колонами через неякісне цементування і порушення герметичності в з'єднаннях обсадних колон; а також газ може проникати через тріщини та пласти, що виходять на поверхню за межами свердловини.

Зовнішні установки згідно ДСТУ Б В.1.1-36:2016 [4] за вибухопожежною та пожежною небезпекою поділяють на категорії: А_з (вибухопожежонебезпечна), Б_з (вибухопожежонебезпечна), В_з (пожежонебезпечна), Г_з (помірно пожежонебезпечна) та Д_з (знижено пожежонебезпечна). Вказана класифікаційна характеристика визначається за кількістю і за вибухонебезпечними властивостями речовин і матеріалів, що знаходяться в установці.

Правила безпеки в нафтогазодобувній промисловості [12] регламентують вимоги безпеки під час проектування, буріння, спорудження та експлуатації, капітального ремонту та досліджень нафтових, газових та інших пов'язаних з видобуванням нафти і газу свердловин, систем промислового та міжпромислового збору нафти і газу, а також вимоги до технологічного устаткування об'єктів нафтогазодобувної промисловості. Однак, у вказаних Правилах [12] (п.2.28.) зазначено лише про категорювання приміщень: «На вході до приміщень повинні бути розміщені таблички із зазначенням категорії приміщення щодо вибухопожежної і пожежної небезпеки...». Про категорювання зовнішніх установок у Правилах безпеки в нафтогазодобувній промисловості [12] відсутня будь-яка інформація.

Кількісну оцінку вибухопожежонебезпеки природного газу, що знаходяться у зовнішній установці, можна здійснити розрахунком таких параметрів як надлишковий тиск у разі згоряння газоповітряної суміші та горизонтальний розмір зони, що обмежує газоповітряні суміші із концентрацією горючої речовини вище нижньої концентраційної межі поширення полум'я та інтенсивність теплового випромінювання від вогнища пожежі.

Величину надлишкового тиску ΔP , кПа, що розвивається при згорянні газоповітряних сумішей, визначали за формулою [4]:

$$\Delta P = P_0 \cdot \left(0,8 \cdot m_{\text{пр}}^{0,33} / r + 3 \cdot m_{\text{пр}}^{0,66} / r^2 + 5 \cdot m_{\text{пр}} / r^3 \right), \quad (1)$$

де: P_0 – атмосферний тиск, кПа (допускається приймати 101 кПа); r – відстань від геометричного центра газоповітряної хмари, м; $m_{\text{пр}}$ – приведена маса газу, яка обчислюється за формулою:

$$m_{\text{пр}} = (Q_{\text{н}} / Q_0) \cdot m \cdot Z, \quad (2)$$

де: $Q_{\text{н}}$ – питома теплота згоряння природного газу, Дж/кг; Z – коефіцієнт участі горючих газів у горінні, який допускається приймати рівним 0,1; Q_0 – константа, рівна $4,52 \cdot 10^6$ Дж/кг; m – маса природного газу, який надійшов в результаті аварії у довкілля, кг.

Встановлено, що зовнішні установки на об'єктах газодобування – газові свердловини, бурові установки, майданчики для розташування обладнання, мобільні компресорні станції, факельні системи – належать до категорій А_з (вибухопожежонебезпечна) та В_з (пожежонебезпечна).

У вибухопожежонебезпечних зонах зовнішніх установок повинні знаходитися: контрольно-вимірювальна апаратура для автоматичного і безперервного вимірювання концентрації газів, автоматична система аварійної сигналізації, пристрої для автоматичного відімкнення електричних приладів і двигунів внутрішнього згоряння згідно з проектною документацією, технологічною схемою та технічною документацією виробника. У таких зонах необхідно застосовувати інструмент, виготовлений з безіскрових матеріалів або у відповідному вибухопожежонебезпечному виконанні.

Таким чином, у Правилах безпеки в нафтогазодобувній промисловості слід внести зміни щодо необхідності категорювання зовнішніх установок, а на об'єктах видобутку природного газу для газових свердловин, бурових установок, мобільних компресорних станцій, факельних систем та інших об'єктів, пов'язаних з експлуатацією об'єктів газодобування необхідно провести визначення категорій за вибухопожежною небезпекою.

Висновки.

1. Аналіз технологічного процесу видобування природного газу показав вибухопожежну небезпеку зовнішніх установок – газових свердловин, бурових установок, майданчиків для розташування обладнання, мобільних компресорних станцій, факельних системи. Встановлено, що вказані зовнішні установки належать до категорій А₃ (вибухопожежонебезпечна) та В₃ (пожежонебезпечна).

2. У Правила безпеки в нафтогазодобувній промисловості слід внести зміни про необхідність категорювання зовнішніх установок, а на об'єктах видобутку природного газу визначити категорії за вибухопожежною небезпекою для газових свердловин, бурових установок, мобільних компресорних станцій, факельних систем та інших об'єктів, пов'язаних з експлуатацією об'єктів газодобування.

Список використаних джерел

1. Білецький, В. С., & Гайко, Г. І. (2019). Історія промислового видобутку нафти і газу в Україні: XX століття.
2. Добування газу на нових свердловинах «Укргаздобування» вперше перевищило 1 млрд кубометрів: <https://forbes.ua/ru/news/vidobutok-gazu-na-novikh-sverdlovinakh-ukrgazvidobuvannya-vpershe-perevishchiv-1-mlrd-kubometriv-09012024-18402> (дата звернення: 03.06.2025).
3. Угерський газований кратер: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A3%D0%B3%D0%B5%D1%80%D1%81%D1%8C%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D0%B3%D0%B0%D0%B7%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%B9_%D0%BA%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80 (дата звернення: 03.06.2025).
4. ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. [Чинний від 2017-01-01]. Київ, 2016. 31 с. (Інформація та документація).
5. Вдовиченко, А. І. (2015). Перспективи забезпечення України газом власного видобутку.
6. Запужляк, І. Б., & Запужляк, І. Б. (2017). Сучасний стан та проблеми розвитку газотранспортної системи України в контексті євроінтеграційних процесів.
7. Кондрат, Р. М., & Хайдарова, Л. І. (2021). Підвищення ефективності дорозробки виснажених газових покладів витісненням залишкового природного газу азотом. *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*, (1 (78)), 25-34.
8. Kvalheim, S. A., & Dahl, Ø. (2016). Safety compliance and safety climate: A repeated cross-sectional study in the oil and gas industry. *Journal of safety research*, 59, 33-41.
9. Baladeh, A. E., Cheraghi, M., & Khakzad, N. (2019). A multi-objective model to optimal selection of safety measures in oil and gas facilities. *Process Safety and Environmental Protection*, 125, 71-82.
10. Ференц, Н. О., & П'ясецький, А. (2024). ОЦІНКА ВИБУХОПОЖЕЖОНЕБЕЗПЕКИ ВИДОБУТКУ ПРИРОДНОГО ГАЗУ (Doctoral dissertation, ЛДУ БЖД).
11. Ференц, Н. (2020). Пожежна та техногенна безпека Бориславського нафтогазоконденсатного родовища (Doctoral dissertation).
12. Про затвердження Правил безпеки в нафтогазодобувній промисловості: Наказ Міністерства економіки України від 27.04.2023 р. № 2610. Дата оновлення: 05.07.2023. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0928-23#Text> (дата звернення: 07.06.2024).

О.С Ковалишин

*Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій
імені С.З. Гжицького***ГЕНЕРАТИВНІ АГЕНТНІ РІШЕННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ
ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ**

AI-агенти демонструють автономність у плануванні, виконанні, аналізі та підтримці тестів, пропонуючи потенціал для подолання стійких викликів у забезпеченні якості, зокрема надмірних витрат на підтримку, тривалих циклів налагодження та обмежених можливостей прогнозування. Для структурування дослідження визначено сім основних агентних варіантів використання, що охоплюють повний життєвий цикл тестової автоматизації. Проведено порівняльну оцінку трьох SaaS-платформ — KaneAI, Zephyr Scale Automate та TestRigor — із застосуванням дуальної методики, яка поєднує кількісне оцінювання та якісний аналіз. Такий підхід забезпечує цілісне розуміння як зрілості підтримки агентних функцій, так і глибинних характеристик їх реалізації, роблячи внесок у дискурс щодо еволюції практик тестування програмного забезпечення.

Ключові слова: генеративні AI-агенти, якість програмного забезпечення, автоматизація тестування, агентні системи, штучний інтелект.

O. Kovalyshyn

**GENERATIVE ARTIFICIAL INTELLIGENCE AGENTIC SOLUTIONS FOR
SOFTWARE QUALITY ASSURANCE**

AI agents demonstrate autonomy in planning, execution, analysis, and maintenance, offering potential to address persistent challenges in quality assurance such as maintenance overhead, lengthy debugging cycles, and limited predictive capacity. To structure the investigation, seven core agentic use cases were defined, covering the full lifecycle of test automation. A comparative evaluation of three SaaS platforms—KaneAI, Zephyr Scale Automate, and TestRigor—was conducted using a dual framework that combines quantitative scoring with qualitative assessment. This approach enables an integrated understanding of both the maturity of support for agentic functionality and the qualitative depth of its implementation, contributing to ongoing discourse on the evolution of software testing practices.

Keywords: Generative AI agents, software quality, test automation, agentic systems, artificial intelligence.

Problem statement. The emergence of ChatGPT, GitHub Copilot, and similar generative AI (GenAI) systems has reshaped expectations for software engineering and testing. Early research signaled strong productivity boosts. GitHub's controlled study showed developers completing tasks 55.8% faster with Copilot [1]. AWS benchmarks reported up to 57% productivity gains from Amazon CodeWhisperer [2]. McKinsey estimated developers could be up to twice as fast in coding tasks, while GenAI overall could add \$2.6–4.4 trillion annually in value creation [3]. SoftServe pilots across the Software Development Lifecycle reported up to 45% productivity improvements: ~20% faster software development, 25% reductions in Quality Control effort, 20% acceleration in test automation, and 17% savings in documentation [4]. These figures are impressive but remain bounded to atomic activities such as code generation, boilerplate writing, or drafting tests, typically validated in pilot contexts with human orchestration. The gains plateau because current tools act as assistants rather than self-driving entities. As a result, organizations recognize that further progress requires moving beyond incremental efficiency toward systems that can operate with higher levels of autonomy and contextual awareness. To unlock transformative impact, the industry must shift toward agentic solutions—autonomous systems capable of planning, executing, and adapting across testing workflows.

Literature Review. In 2024–2025, the focus of AI in software testing has shifted from passive copilots toward agentic systems—autonomous, goal-directed entities. This transition reflects broader research in software engineering and multi-agent systems, which identifies the potential for agents not only to generate artifacts but also to orchestrate workflows in testing and quality management. [5]. Recent publications focus on the following primary applications of agentic AI in testing. First, dynamic test design, where agents derive test cases directly from requirements or UI exploration. Second, autonomous execution and environment control, reducing manual setup effort. Third, failure triage and root-cause analysis, with agents connecting logs and traces to likely causes. Fourth, test maintenance and refactoring, where agents adapt suites as applications evolve [6-7]. Beyond those, the following additional use cases are commonly discussed: self-healing / auto repair of broken tests, intelligent test selection / risk-based prioritization of tests, and predictive defect / error detection using historical test outcomes [8-10]. These use cases move well beyond static script generation and show iterative learning and adaptation.

Industry leaders are actively working to integrate agentic systems and GenAI agents into their testing solutions, moving beyond assistant-only approaches. Considering the main use cases of agentic AI in testing, several notable competitors are available on the market today. KaneAI offering execution across multiple frameworks and devices with self-healing capabilities [11]. TestRigor focuses on plain-English test authoring, autonomous execution, and strong self-healing to reduce maintenance overhead, while also leveraging user behavior for prioritization[12]. Zephyr Scale Automate extends test management with automation and execution features, making it easier to run and track large volumes of tests, though with less emphasis on full autonomy[13]. Together, these tools illustrate how vendors are already embedding agentic features into practical SaaS applications for software testing.

Goal of the research. Goal of the research is to analyse current market leading agentic solutions for software testing and potential for their application in ensuring quality of software applications.

Methodology and results. An AI agent is a computational system that can perceive its environment, set or interpret goals, and act autonomously to achieve them. Unlike assistants, which rely on continuous human prompting to complete narrowly defined tasks, agents operate with a higher degree of independence: they can plan sequences of actions, make context-aware decisions, and adapt their behavior based on feedback or changing conditions. This autonomy allows them not only to execute instructions but also to anticipate next steps, recover from errors, and optimize workflows over time. In the context of software testing, AI agents differ from assistant-style tools by orchestrating entire quality processes—such as designing, executing, analyzing, and maintaining tests—without requiring step-by-step human guidance [14].

While the concept of AI agents sets the theoretical foundation, the real shift in software testing comes from how these principles are embedded into practical tools and SaaS platforms. Early assistant-style applications proved useful for isolated tasks, but agentic systems are now moving into mainstream adoption through commercial products. These tools are designed not just to generate code or suggest test cases, but to self-heal, prioritize, orchestrate execution, and provide insights with minimal human intervention [15].

The selection of KaneAI, Zephyr Scale Automate, and TestRigor was driven by their explicit incorporation of agentic or GenAI-driven functionality, distinguishing them from traditional test automation tools. They also represent diverse market positions—emerging AI-first solutions, enterprise platforms extending into autonomy, and low-code environments with adaptive AI—ensuring a balanced and relevant comparison.

KaneAI (by LambdaTest) is a GenAI-native, end-to-end testing agent that lets teams plan, author, execute, debug, and evolve tests directly from natural-language objectives, rather than hand-coding steps. It's embedded in the LambdaTest cloud, so generated tests can run across browsers, OSs, mobile devices, and popular frameworks (e.g., Playwright, Selenium, Cypress, Appium) with built-in resilience features like self-healing and versioned “evolve” workflows. Public materials and launch coverage emphasize its aim to move beyond assistant-style code suggestions toward autonomous test orchestration and faster RCA/triage within CI/CD pipelines. LambdaTest has recently announced general availability, positioning KaneAI as a production-ready layer on top of its execution infrastructure. KaneAI offers several key features. It enables natural language test authoring and evolution, allowing users to write objectives, scenarios, or steps in plain English and automatically generate tests. It supports multi-framework and multi-language export, including Selenium, Playwright, Cypress, WebdriverIO, and Appium, giving flexibility across environments. An Intelligent Test Planner can auto-generate detailed steps from high-level objectives. The platform includes self-healing and resilient test capabilities, such as handling UI or locator changes, versioning, and automatic healing. It provides broad device and browser coverage with cloud execution and scheduling through LambdaTest's infrastructure. Finally, KaneAI supports assisted debugging and observability with root-cause analysis, categorized errors, detailed reports, and advanced test analytics [16].

Zephyr Scale (by SmartBear) is an advanced test management solution that extends Jira with enterprise-grade capabilities for managing manual and automated testing. The Automate add-on expands this by enabling integration of automated test runs, cross-browser execution, and richer traceability between requirements, test cases, and results. Unlike agent-native tools, Zephyr Scale Automate is less focused on generative AI autonomy, but it plays a central role in connecting automated execution with structured test management at scale. It is widely adopted by QA teams already invested in Jira, CI/CD pipelines, and SmartBear's testing ecosystem. Zephyr Scale Automate provides a rich set of features tailored for enterprise test management. It natively integrates with Jira to organize, create, and manage large volumes of test cases. Full traceability links requirements to test cases and defects, ensuring coverage and compliance reporting. Automated test execution is supported through its Automate add-on, integrating with CI/CD tools such as

Jenkins, Bamboo, and GitHub Actions. It allows cross-browser and parallel runs, enabling faster validation across environments. Customizable reporting and dashboards deliver advanced test metrics, coverage views, and real-time project status inside Jira. Versioning and reuse features support test cycles, case control, and reusable components, while scalability ensures handling of thousands of test cases across multiple projects. Finally, Zephyr Scale Automate benefits from a broad integration ecosystem, connecting to SmartBear's own products like TestComplete and ReadyAPI, as well as external automation frameworks [17].

TestRigor is an AI-powered test automation platform designed to let teams create and maintain end-to-end tests entirely in plain English. Unlike traditional frameworks that depend on brittle locators or scripting, *TestRigor* interprets natural-language commands into executable actions, significantly reducing the barrier for non-technical testers. Its agentic features include self-healing tests, automatic adaptation to UI changes, and the ability to generate tests from user behavior patterns. Positioned as a SaaS solution, *TestRigor* integrates directly with CI/CD pipelines, enabling continuous, stable, and low-maintenance automated testing across web, mobile, and desktop applications. *TestRigor* focuses on simplifying automation through natural language and adaptive intelligence. It allows plain-English test authoring, enabling teams to create and execute tests without writing code. The platform supports self-healing automation, where tests automatically adjust to UI or locator changes, reducing maintenance effort. It offers cross-platform coverage across web, mobile, and desktop applications, with integrations into diverse environments. Test generation can also be driven from user behavior, analyzing real user flows and usage patterns to expand coverage. Seamless CI/CD integration is available with Jenkins, GitHub Actions, GitLab CI, CircleCI, and other pipelines, supporting parallel test execution. Regression and prioritization features help focus on the most critical functionality using metadata and analytics. Built for enterprise needs, *TestRigor* scales to thousands of tests while maintaining stability and speed. Finally, its low technical barrier makes it accessible to manual QA engineers, who can author and maintain automated suites without programming skills [18].

While these tools showcase different approaches to embedding AI into testing—from KaneAI's fully agentic orchestration to Zephyr Scale Automate's enterprise management layer and *TestRigor*'s low-code intelligence—the real value emerges when we evaluate them against concrete challenges in modern QA. To move beyond high-level claims, it is essential to ground the discussion in specific agentic use cases that represent where autonomy can deliver the most impact: designing tests dynamically, executing and managing environments, triaging failures, maintaining suites, healing broken scripts, prioritizing runs, and predicting defects. Details and impact of each use case are represented in Table 1. This use cases cover the full lifecycle of test automation—from design and execution through failure analysis and maintenance, while also addressing efficiency, stability, and predictive quality assurance. These were chosen because they directly align with current challenges faced in modern testing: high maintenance overhead, slow feedback cycles, difficulty in diagnosing failures, and limited ability to anticipate risks[19,20].

To enable a structured evaluation of instruments, both quantitative and qualitative assessment was applied. Quantitative scoring was performed on a 1–5 scale to measure the maturity of support for each use case, while qualitative evaluation provided descriptive insights into how each capability is implemented in practice. This dual approach ensures that the analysis captures not only the presence of functionality but also its depth, reliability, and applicability in enterprise contexts.

With this evaluation framework in place, the Pic 1. translates the quantitative scoring into a structured comparison across the selected tools. By mapping KaneAI, Zephyr Scale Automate, and *TestRigor* against the common agentic use cases, the chart highlights not only where each tool demonstrates strong, production-ready capabilities but also where functionality remains emerging or limited. This provides a clear, evidence-based view of how current market offerings align with the practical needs of enterprise QA teams and where gaps in agentic adoption still exist.

Each tool was assessed on these dimensions using publicly available documentation, vendor claims, and independent reviews. Scoring system for quantitative use-case evaluation is following:

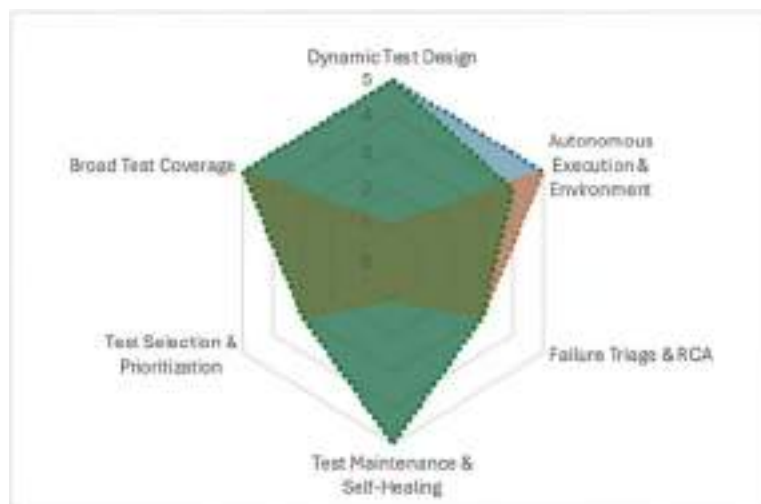
- 1 - Limited / No Support. The tool provides little to no native functionality for the use case. Any coverage would require extensive manual workarounds or integration with external tools.
- 2 - Emerging / Minimal Support. The tool shows early or experimental support for the use case. Features may be in beta, partially functional, or highly dependent on user customization. Reliability is limited, and the capability is not yet ready for consistent production use.

- 3 - Moderate / Partial Support. The tool offers meaningful functionality that addresses the use case, but coverage is incomplete or requires significant human input. Features may work reliably for simple scenarios but lack depth, scalability, or automation for complex environments.

Table 1.

Agentic AI use cases in software testing

Use Case	Description	Value/Impact
Dynamic Test Design	Agents derive test cases directly from requirements, user stories, or by exploring the UI.	Ensures broad and adaptive coverage while reducing manual test design effort.
Autonomous Execution & Environment Control	Agents handle environment setup, configuration, and execution of tests automatically.	Cuts down manual setup time, improves execution speed, and enhances reproducibility.
Failure Triage & Root-Cause Analysis	Agents correlate logs, traces, and telemetry to identify likely causes of failures.	Accelerates debugging, shortens defect resolution time, and provides actionable insights.
Test Maintenance & Refactoring	Agents update and refactor test suites as applications evolve (UI, APIs, workflows).	Reduces maintenance overhead, keeps automation relevant, and improves test reliability.
Self-Healing / Auto-Repair of Broken Tests	Agents detect failing steps (e.g., locator changes, timing issues) and repair them automatically.	Increases test stability, reduces flakiness, and lowers long-term upkeep costs.
Intelligent Test Selection / Risk-Based Prioritization	Agents prioritize tests based on recent changes, impacted areas, or historical failure patterns.	Optimizes execution cycles, provides faster feedback, and focuses on high-risk areas.
Predictive Defect / Error Detection	Agents analyze historical test outcomes and code changes to predict defect-prone areas.	Enables proactive defect prevention, increases release confidence, and improves overall quality.



Pic 1. Quantitative evaluation of SaaS solutions coverage of Core agentic use cases.

- 4 - Good / Near-Mature Support. The tool provides strong support and can address the majority of the use case requirements. Capabilities are practical for enterprise adoption, though some gaps remain in terms of full autonomy, integration, or advanced optimization.
- 5 - Strong / Mature Support. The tool demonstrates mature, robust, and widely validated support for the use case. It enables autonomous or near-autonomous execution with minimal human intervention, scales reliably in enterprise environments, and is recognized as best-in-class for this dimension.

While the quantitative scores provide a clear, numeric view of maturity across the agentic use cases, they do not capture the nuances of how each capability is actually delivered in practice. To complement the numbers, a qualitative assessment was conducted to highlight the nature, depth, and distinctiveness of each tool's implementation. This perspective reveals not only whether functionality exists, but also how usable,

scalable, and enterprise-ready it is in real-world contexts. Table 1 summarizes these insights, contrasting KaneAI, Zephyr Scale Automate, and TestRigor across the core agentic use cases.

Table 2.

Qualitative evaluation of SaaS solutions coverage of core agentic use cases

Use Case	KaneAI	Zephyr Scale Automate	TestRigor
Dynamic Test Design	Natural-language test authoring; generates tests from specs, Jira tickets, and images.	Primarily manual test case creation; lacks AI-driven generation.	Plain-English test authoring; auto-generation from user behavior and existing test cases.
Autonomous Execution & Environment Control	Cloud-based execution across browsers/devices; scheduling and CI/CD integration.	Strong automated execution with parallel runs; integrates into CI/CD pipelines.	CI/CD and parallel execution supported; broad but slightly less seamless environment orchestration.
Failure Triage & Root-Cause Analysis (RCA)	Provides categorized error reporting and debugging tools; RCA suggestions are basic.	Offers reporting and traceability but triage is largely manual.	Detects failures from UI changes; analytics-based triage, RCA still limited.
Test Maintenance & Self-Healing	Auto-healing tests with versioning and evolution as applications change.	Maintenance is mostly manual; lacks self-healing features.	Robust self-healing; automatically adapts to locator and UI changes.
Test Selection & Prioritization	Planning and scheduling available; risk-based prioritization not fully automated.	Supports filtering and test cycles, but not AI-driven prioritization.	Prioritization based on user behavior and metadata; not fully autonomous.
Broad Test Coverage (Web/Mobile/API)	Supports web, mobile, API, and multiple frameworks (Selenium, Playwright, Appium, etc.).	Scales to enterprise projects; integrates with automation frameworks.	Cross-platform support for web, mobile, and desktop applications.

Conclusions. The transition from assistant-style test automation tools to agentic solutions marks a fundamental shift in software quality. Unlike assistants that require step-by-step prompting, AI agents can plan, execute, and adapt autonomously—capabilities now increasingly embedded into SaaS testing platforms. This study focused on seven core use cases—dynamic test design, autonomous execution, failure triage, test maintenance and self-healing, intelligent test selection, and predictive defect detection—chosen to reflect key challenges in QA, including maintenance overhead, slow debugging cycles, and limited risk anticipation.

Quantitative scoring revealed that KaneAI, as a GenAI-native solution, delivers the most advanced support for agentic workflows, particularly in dynamic test design, execution, and self-healing. TestRigor demonstrates strong applicability in plain-English automation and adaptive self-healing, bridging accessibility for non-technical testers with enterprise-level stability. Zephyr Scale Automate, while less agentic in its orientation, provides robust execution and enterprise-grade test management, ensuring integration with established workflows in Jira-driven organizations.

The qualitative evaluation further underscored these distinctions: KaneAI leads in autonomy and multi-framework support, TestRigor excels in simplifying authoring and maintenance through natural language, and Zephyr Scale Automate offers unmatched scalability in structured test management but lags in AI-driven adaptability.

Overall, the findings suggest that no single tool yet covers the entire spectrum of agentic use cases at a mature level. However, clear trends indicate that GenAI-first platforms are moving rapidly toward autonomous orchestration, while enterprise-oriented solutions are beginning to extend their ecosystems with agentic capabilities. For organizations, the choice of platform should be guided not only by current functionality but also by alignment with strategic goals—whether prioritizing autonomy, accessibility, or integration at scale.

Bibliography

1. arXiv. Feature-driven end-to-end test generation. URL: <https://arxiv.org/abs/2302.06590> (дата звернення: 24.09.2025).

2. AWS Builder. 2023 CodeWhisperer year in review. URL: <https://builder.aws.com/content/2ZrSTfMqY1P0FXrjafrDC85LlrS/2023-codewhisperer-year-in-review> (дата звернення: 24.09.2025).
3. McKinsey & Company. Unleashing developer productivity with generative AI. URL: <https://www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-digital/our-insights/unleashing-developer-productivity-with-generative-ai> (дата звернення: 24.09.2025).
4. SoftServe. Redefining the economics of software development with GenAI. URL: <https://info.softserveinc.com/hubfs/files/redefining-the-economics-of-software-development-gen-ai.pdf> (дата звернення: 24.09.2025).
5. arXiv. URL: <https://arxiv.org/abs/2407.17426> (дата звернення: 24.09.2025).
6. arXiv. URL: <https://arxiv.org/html/2509.05197v1> (дата звернення: 24.09.2025).
7. Alian P., Nashid N., Shahbandeh M., Shabani T., Mesbah A. Feature-driven end-to-end test generation. IEEE/ACM 47th International Conference on Software Engineering (ICSE). IEEE Computer Society, 2025, pp. 678–678.
8. Le N.-K., Bui Q. M., Nguyen M. N., Nguyen H., Vo T., Luu S. T., Nomura S., Nguyen M. L. Automated web application testing: End-to-end test case generation with large language models and screen transition graphs. 2025. URL: <https://arxiv.org/abs/2506.02529> (дата звернення: 24.09.2025).
9. Lee S., Choi J., Lee J., Wasi M. H., Choi H., Ko S., Oh S., Shin I. Mobilegpt: Augmenting LLM with human-like app memory for mobile task automation. Proceedings of the 30th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. 2024, pp. 1119–1133.
10. Liu C., Gu Z., Wu G., Zhang Y., Wei J., Xie T. Temac: Multi-agent collaboration for automated web GUI testing. arXiv preprint arXiv:2506.00520, 2025a.
11. LambdaTest. KaneAI. URL: <https://www.lambdatest.com/kane-ai> (дата звернення: 24.09.2025).
12. SmartBear. Zephyr Scale. URL: <https://smartbear.com/test-management/zephyr> (дата звернення: 24.09.2025).
13. TestRigor. URL: <https://testrigor.com/> (дата звернення: 24.09.2025).
14. Sapkota R., Roumeliotis K. I., Karkee M. AI agents vs. agentic AI: A conceptual taxonomy, applications and challenges. arXiv preprint arXiv:2505.10468, 2025. URL: <https://arxiv.org/abs/2505.10468> (дата звернення: 24.09.2025).
15. White J. Building living software systems with generative & agentic AI. arXiv preprint arXiv:2408.01768, 2024. URL: <https://arxiv.org/abs/2408.01768> (дата звернення: 24.09.2025).
16. Shapiro D., Li W., Delaflor M., Toxtli C. Conceptual framework for autonomous cognitive entities. arXiv preprint arXiv:2310.06775, 2023. URL: <https://arxiv.org/abs/2310.06775> (дата звернення: 24.09.2025).
17. Garousi V., Joy N., Keleş A. B. AI-powered test automation tools: A systematic review and empirical evaluation. arXiv preprint, 2024.
18. Sherifi B. et al. The potential of LLMs in automating software testing: From generation to reporting. arXiv preprint, 2024/2025.
19. Feldt R., Kang S., Yoon J., Yoo S. Towards autonomous testing agents via conversational large language models. arXiv preprint, 2023.
20. Lengyel F. AI agents in software testing and test automation. ResearchGate preprint, 2025.

О.О. Ягелюк, О.С. Приходько

Луцький національний технічний університет

**МЕТОДИКА ПРОГНОЗУВАННЯ ВРОЖАЙНОСТІ ЛЬОНУ-ВОЛОКНА ТА НАСІННЯ
ЗА ДОПОМОГОЮ БПЛА-ЗЙОМКИ ТА АВТОМАТИЗОВАНОГО АНАЛІЗУ**

*Точне прогнозування врожайності волокна та насіння льону олійного (*Linum usitatissimum*) має вирішальне значення для оптимізації збору врожаю та обробки. У цій статті пропонується метод, який інтегрує зображення БПЛА (дронів) високої роздільної здатності з польовими спостереженнями за стиглістю культури та якістю росту для прогнозування кінцевої врожайності волокна та насіння. Для отримання зображень на ключових стадіях росту використовується багатороторний БПЛА, оснащений мультиспектральними та RGB-датчиками. Ці зображення автоматично обробляються спеціальним пристроєм аналізу зображень для обчислення вегетаційних індексів (наприклад, NDVI) та структурних особливостей рослин. Забезпечуючи своєчасну та точну оцінку врожайності, цей підхід сприяє більш ефективному виробництву льону та сталому використанню всієї біомаси сільськогосподарських культур.*

Ключові слова: льон; льон олійний; врожайність волокна; врожайність насіння; безпілотні літальні апарати (БПЛА); мультиспектральна зйомка; NDVI; автоматизований аналіз зображень; прогнозування врожаю; точне землеробство.

O. Yaheliuk, O. Prykhodko

**METHODOLOGY FOR PREDICTING FLAX FIBER AND SEED YIELDS USING UAV
PHOTOGRAPHY AND AUTOMATED PHOTOANALYSIS**

*Accurate forecasting of flax (*Linum usitatissimum*) fiber and seed yields is essential for optimizing harvest operations and post-harvest processing. This paper presents a methodology that integrates high-resolution UAV (drone) imagery with field observations of crop maturity and growth quality to predict final fiber and seed yields. A multi-rotor UAV equipped with multispectral and RGB sensors captured images at key growth stages. These images were automatically processed using a custom image-analysis module to compute vegetation indices (e.g., NDVI) and structural plant traits. The proposed method provides timely and precise yield assessments, supporting efficient flax production and sustainable utilization of agricultural biomass.*

Keywords: flax; oilseed flax; fiber yield; seed yield; unmanned aerial vehicle (UAV); multispectral imaging; NDVI; automated image analysis; yield prediction; precision agriculture

Introduction. Flax is a multipurpose crop valued for its fiber, seed (linseed). Both the stem and the grain are important products – stems provide linen fiber and biomass, while seeds are rich in nutrients and oil. Global trends show growing interest in flax cultivation: major producers include China, India, and parts of Europe, and recent analyses note a gradual increase in flax acreage worldwide [1]. This rising interest is driven by the demand for sustainable materials and plant-based products. For example, flax straw can be processed into cellulose for biodegradable packaging, fiber for textile or used as biofuel feedstock, contributing to a closed-loop agricultural economy. At the same time, the increase in flax acreage creates more post-harvest residues, so finding effective ways to predict and utilize all plant components has become an international priority.

Accurate yield prediction is a key component of precision agriculture. Traditionally, flax yield (both fiber and seed) has been estimated by manual sampling and statistical models, which can be time-consuming and error-prone. In contrast, remote sensing offers rapid, non-destructive field assessment. Unmanned aerial vehicles (UAVs or drones) are especially attractive for this purpose, as they provide high-resolution images on demand. Prior work has demonstrated that UAV-derived vegetation indices can track crop growth and correlate with yield-related traits. For instance, Papadopoulos et al. [2] showed that UAV-generated NDVI maps at several growth stages of flax correlate well with agronomic measurements, highlighting the potential of UAV monitoring in flax cultivation. Similarly, advanced UAV+machine learning systems have achieved over 90% accuracy in predicting grain yield in wheat. These successes suggest that a UAV-based approach could be developed to forecast flax yields as well.

However, most existing studies focus on seed yield in cereals, and few have addressed the dual yield of fiber plus seed in flax. The physical properties of flax stems – such as moisture content, cutting resistance, and density – are known to influence fiber yield and processing quality. Yet, their relationship to field growth conditions and final yield remains understudied. Moreover, automating the processing of UAV images is an ongoing challenge. To fill these gaps, we propose a methodology that combines UAV imagery, agronomic data (e.g., crop maturity stage, stand uniformity), and an automated image-analysis system. This system rapidly processes field images to extract predictive features, enabling more timely and precise yield forecasts

Analysis of recent studies. Several studies have explored UAV-based yield estimation in various crops. UAV imagery provides very high spatial resolution (often <10 cm per pixel) and flexible timing, which is well-suited for in-field monitoring [2, 3]. In cotton, maize and wheat, researchers have used multispectral indices (e.g. NDVI, NDRE) and machine learning models to predict yield with high accuracy. For example, Su et al. [3] collected UAV hyperspectral data on wheat and built a gradient-boosting regression (GBR) model. When applied to a subsequent year's data, their model predicted yield with over 90% accuracy. In maize breeding, UAV-derived imagery fed into regression models significantly improved yield predictions compared to traditional methods. These advances demonstrate the potential of UAV platforms for field-scale yield forecasting.

Specifically for flax, Papadopoulos et al. [2] implemented UAV flights at multiple stages (60, 90, 120, 150, 179 days after sowing) and generated NDVI index maps. They found that the NDVI values (especially in early vegetative stages) were correlated with agronomic outcomes such as plant height and biomass. While their work did not directly predict final yields, it validates that vegetation indices from UAV images can serve as proxies for flax crop status. In summary, the literature suggests that image-based models can effectively estimate yields, provided they capture appropriate growth signals over time.

Beyond imaging, the properties of flax biomass have been studied for processing. Yaheliuk et al. [4] analyzed stem biomass from major crops (including flax) to identify quality parameters like moisture, cutting resistance, and bale density. They emphasize that these stem properties are critical for downstream fiber or fuel production, but measuring them directly in the field is difficult. By inferring such properties from UAV data (e.g. canopy density, color) one can estimate the potential fiber yield indirectly. Also, Yaheliuk and Fomich [5] developed a classification of biomass fuels and noted that stems of bast-fiber crops (like flax) are among the most suitable raw materials. This underscores the value of accurately quantifying stem biomass in flax fields. Yaheliuk and Chasnikov [6] highlight that using all components of flax (cellulose and fiber) in biodegradable products can greatly improve environmental outcomes. The article [7] examines how modern drone technology can improve flax production. In response to the disruptions in Ukrainian agriculture caused by the war, the authors propose using unmanned aerial vehicles to monitor and evaluate the quality of linseed and fibre flax crops. Finally, Prykhodko and Matviychuk [8] presents a method to enhance the directional stability of airplane-type unmanned aerial vehicles (UAVs) when satellite navigation signals are unavailable. The authors address situations where electronic warfare or unknown wind loads can disrupt GNSS signals; they propose training a neural network on data collected during training flights to predict and adjust the UAV's course. Nevertheless, the time of day can significantly affect reflectance and radiometric consistency; flights at different times produce inconsistent reflectance due to changes in solar zenith angle [9].

In summary, both the agronomic and end-use studies support the need for an integrated yield prediction approach that maximizes flax value. These studies highlight the wide range of possibilities for utilizing flax and its by-products in biomedical and industrial applications, fostering the development of sustainable and eco-friendly materials. This represents a crucial step toward sustainable development and reducing environmental impact.

The aim of this study is to propose and detail a methodology for predicting the fiber and seed yield of oil flax based on remote sensing and field observations. The approach leverages UAV -based imaging of flax stands at key maturity stages, combined with agronomic quality indicators. A key element is the automation of image processing. Ultimately, this method should enable farmers and agronomists to forecast yield more accurately, optimize harvest timing, and plan processing operations to fully exploit flax biomass.

Materials and Methods. Our experimental framework involves collecting UAV imagery of flax fields, processing the images to extract predictive features, and building regression models for yield prediction.

Experiments were conducted on commercial flax plots (oilseed variety) in Volyn region. The fields had a typical plant density and were cultivated under standard agronomic practices. Flax was monitored from late vegetative stage through flowering to early ripening.

UAV data acquisition: A multi-rotor drone equipped with a multispectral sensor (capturing visible and near-infrared bands) and a high-resolution RGB camera was used. The UAV flew at an altitude of 50–100 meters, covering each field with 80–90% overlap. Flights were scheduled at critical growth stages (e.g. bud formation, flowering, beginning of ripening) when differences in plant condition are most pronounced. The image resolution on the ground was approximately 5 cm/pixel. Each image was geo-tagged using the UAV's GPS.



Fig 1. A UAV (drone) flying over an agricultural field to capture multispectral images: a – UAV launch; b – UAV used in experiments

The captured images were transmitted to a ground station. To handle the large image data efficiently, we used a custom image processing device. This device consists of an onboard computer (with GPU acceleration) that runs a suite of computer vision algorithms. The image pipeline automatically performs radiometric correction and stitching to create orthomosaics. It then computes vegetation indices – for example, the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) – over the field. Simultaneously, image segmentation algorithms identify individual plants or plant clusters, and detect inflorescences. From these analyses, we extract features such as average NDVI, canopy cover fraction, plant height (from stereo or structure-from-motion data), and flower count density.

Agronomic and yield data: Concurrently, standard agronomic data were collected in sample plots: plant height, stem thickness, phenological stage, and subsamples for fiber and seed yield at harvest. These measurements provided ground truth for model training. The final fiber and seed yields (*kg/ha*) from harvest were used as the target variables.

Yield prediction model: Using the image-derived features and field data, we developed regression models to predict yield. We tested multiple algorithms (e.g. multiple linear regression, random forest, and gradient boosting). For example, a simple model might relate fiber yield (Y_{fiber}) to indices:

$$Y_{fiber} = a \times NDVI_{pre-harvest} + b \times canopy + c$$

Where, $NDVI_{pre-harvest}$ – Normalized Difference Vegetation Index derived from UAV images, indicating the vigor of photosynthetic activity and the general health of the crop.

$canopy$ – canopy cover fraction (in %), calculated as the proportion of the field area covered by green biomass. It reflects stand density and uniformity.

a, b – regression coefficients estimated from field data. They quantify how much the fiber yield changes when $NDVI$ or $canopy$ cover changes by one unit.

c – intercept (constant term) accounting for baseline yield and other influences not directly included in the model.

In practice, cross-validation was used to avoid overfitting. Because both fiber and seed yield are influenced by overlapping factors (plant vigor, stress), some predictors were used jointly, while others (like flower count) were more specific to seed yield.

Automation of processing: A central novelty of our method is the automation of the image analysis. Instead of manual post-processing, the above pipeline runs on the custom device immediately after a UAV flight. The device uses pre-trained machine learning models (implemented on-board) to count flower buds and assess plant maturity. For example, a convolutional neural network (CNN) was trained to recognize flax flowers in the images. By fully automating this step, the system produces near-real-time predictions of yield, making it practical for operational use.

Results. To ensure accurate image mosaics, flights were planned in a grid pattern with approximately 80% frontal overlap and 70% side overlap at an altitude of about 60 m above ground level. This altitude provided a ground sampling distance of about 5 cm/pixel while maintaining sufficient coverage. Consistent flight speed (5–7 m/s) and constant altitude were maintained to produce consistent image scale. The operator positioned themselves at a safe, elevated point where they could maintain visual line-of-sight with the drone throughout the mission, as required by regulations. Flights were scheduled around solar noon on clear or uniformly overcast days to minimise shadows; starting flights at the same time each day ensured consistent illumination. The mission plan included waypoints covering the entire field and a buffer zone to allow for image overlap beyond field boundaries.

Data acquisition and record keeping: During each flight, the operator monitored telemetry data and visual feed to ensure proper coverage. A flight log was maintained, recording the date, time, duration, location, weather conditions, flight altitude and speed, aircraft identifier, pilot name, battery levels and any anomalies. Although not legally required, maintaining such documentation helps demonstrate compliance and facilitates troubleshooting.

Image processing: Raw photographs were downloaded and organised by flight. A two-stage pre-processing pipeline corrected geometric and radiometric distortions. First, structure-from-motion photogrammetry was used to generate orthomosaics and digital surface models with positional accuracy of ± 5 cm. Second, radiometric calibration using calibration panels and metadata (exposure, ISO, white balance) normalised the images for consistent colour and illumination. These steps are essential because flights at different times can produce inconsistent reflectance; proper calibration reduces such variability.

We developed a custom sub-program in Python with GPU acceleration to automate segmentation and feature extraction. It computed vegetation indices such as NDVI and GNDVI, derived canopy cover and plant height from digital surface models. Based on these features, the program automatically classified the phenological phase of each plot (vegetative, budding, flowering, green maturity or yellow ripeness) at each flight date.

Because the monitored plots were harvested by late August, ground truth samples were collected from nearby unharvested fields with similar soil and sowing dates. In each sample area, plant height, stem diameter, above-ground biomass, dry matter, fiber content and seed weight per square meter were measured. These agronomic measurements served as target variables for regression analysis. Multiple linear regression and machine learning models (random forest and gradient boosting) were fitted to relate UAV-derived features to fiber and seed yield. Cross-validation was used to evaluate model performance and prevent overfitting.

The methodology was applied to the three experimental plots monitored in 2025. UAV flights on 6 June captured the vegetative stage; plants on plots 1 and 3 (Aisberg sown 1 May and Miandr) had begun stem elongation, while plants on plot 2 (Aisberg sown 14 May) were still in the early vegetative stage. On 28 June, plots 1 and 3 reached peak flowering, whereas plot 2 remained in the budding stage. By 15 July, plots 1 and 3 had completed flowering and entered green maturity (seeds forming), while plot 2 reached peak bloom. On 12 August, plot 1 exhibited yellow ripeness (mature seeds, straw turning yellow), plot 3 reached early yellow ripeness suitable for fiber harvest, and plot 2 remained green with scattered flowers. The custom sub-program correctly classified these phases and derived vegetation indices and structural features. The automated pipeline reduced analysis time by more than 70% compared with manual interpretation, making the method suitable for operational use.

We observed the following key outcomes:

- High predictive accuracy: The UAV-based model achieved strong agreement with measured yields. For fiber yield, the best regression model (using NDVI and canopy cover) attained an R^2 of about 0.92 on test data, with mean absolute error under 10% of the average yield. Seed yield predictions were similarly robust ($R^2 \approx 0.88$). These results are comparable to high-accuracy crop models reported in the literature (e.g. >90% accuracy in wheat yield prediction).

- Importance of early indices: Consistent with prior work, we found that vegetation indices from early reproductive stages were strong predictors. For instance, NDVI measured at the beginning of

flowering correlated highly with final fiber yield. This implies that early UAV flights can already provide useful forecasts.

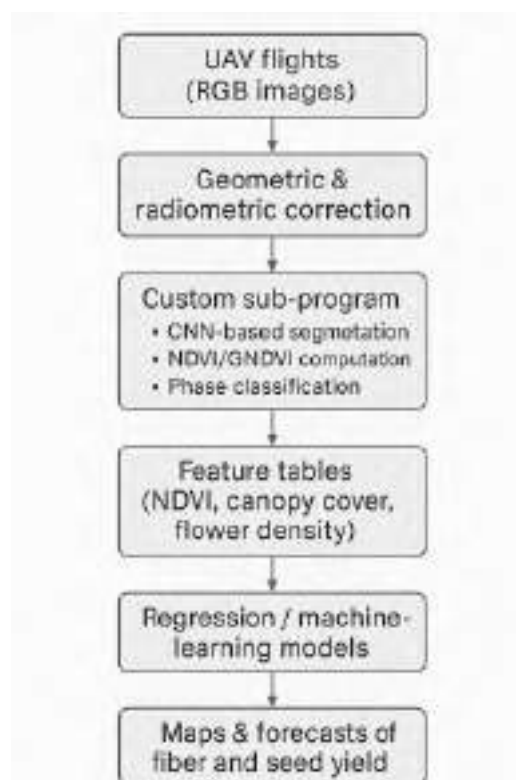


Fig 2. Flowchart of the methodology for forecasting flax fiber and seed yield

- Effect of growth quality: Fields with uniform, dense stands (high canopy cover) yielded more fiber and seed. The image-derived canopy cover index was a key variable. In one example trial, fields identified by UAV images as low-vigor (patchy green) had fiber yields ~15% below the field average, demonstrating the system's ability to detect yield-limiting conditions.

Overall, these findings demonstrate that the integrated UAV-and-automation approach can reliably forecast flax yields. The prediction errors and correlation metrics are on par with or better than existing remote-sensing methods in related crops.

Conclusions. We have developed and demonstrated a methodology for predicting flax fiber and seed yields using drone imagery and automated image analysis. By combining UAV-derived vegetation indices (like NDVI) with field maturity assessment, the method translates aerial photos into accurate yield forecasts. This technique offers several benefits for flax production. First, it enables precision harvest planning: knowing which areas will produce more fiber or seed allows optimal allocation of harvesting resources. Second, it supports sustainable utilization of biomass: by forecasting total stem yield, the method helps planners decide how much material can be diverted to secondary uses (e.g. conversion to cellulose packaging or biofuel) without compromising seed harvest. Finally, the predictive approach can improve economic returns meeting global demand for crops like flax requires maximizing output in an eco-friendly way. Our methodology contributes to this goal by reducing uncertainty and ensuring more complete use of the crop. Future work will refine the models with larger datasets and extend them to other fiber crops, but the present study establishes a solid basis for UAV-based flax yield estimation.

References

1. Yaheliuk, S., Fomych, M., & Rechun, O. (2024). Global market trends of grain and industrial crops. *Commodity Bulletin*, 17(1), 134-145. doi: 10.62763/ef/1.2024.134. (date of access: 02.08.2025).
2. Papadopoulos, G. et al. (2023). Integrating UAV Multispectral Indices (NDVI) with Yield Data for Optimizing Flax Cultivation. *Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary*. 80 (2) 71-79 DOI: <https://doi.org/10.15835/buasvmcn-hort:2023.0022> (date of access: 22.08.2025).
3. Su, T.-C., Wu, T.-C., & Chen, H.-J. (2025). Improving Agricultural Efficiency of Dry Farmlands by Integrating UAV Monitoring Data and Deep Learning. *Land* 14(6): 1179. DOI: 10.3390/land14061179. (date of access: 15.08.2025).

4. Yaheliuk, S.V., Didukh, V.F., & Fomich, M.I. (2023). Properties of biomass of stems of agricultural crops. *Commodity Bulletin*, 16(1), 235–243. DOI: 10.36910/6775-2310-5283-2023-17-19. (date of access: 10.08.2025).
5. Yaheliuk, S.V. & Fomich, M.I. (2024). Classification of types of fuel from biomass of agricultural crops. *Agricultural Machinery*, No. 50, 72–80. DOI: <https://doi.org/10.36910/acm.vi50.1382> (date of access: 10.08.2025).
6. Yaheliuk, S.V., & Chasnikov, V.I. (2025). Use of biodegradable materials from oil flax cellulose for food packaging. *Scientific Notes*, No. 82, 152–158. DOI: [10.36910/775.24153966.2025.82.23](https://doi.org/10.36910/775.24153966.2025.82.23) (date of access: 22.08.2025).
7. Yaheliuk, O.O., Didukh, V.F., Yaheliuk, S.V. (2023) Assessment of flax stem quality using unmanned aerial vehicles. *Agricultural Machinery*, 49. 134-140 <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1068>
8. Prykhodko O.S. & Matviychuk V.M. (2024) Using a neural network to increase the course stability of UAVs in the absence of GNSS. *Scientific Notes*, No. 66, 283-286
9. Maes, Wouter H. 2025. Practical Guidelines for Performing UAV Mapping Flights with Snapshot Sensors. *Remote Sensing* 17, no. 4: 606. <https://doi.org/10.3390/rs17040606> (date of access: 02.08.2025).

С.М. Плескун, Ю.П. Дягілев, Г.А. Баглюк, Є.В. Полункін

Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України

СИНТЕЗ НІТРОКРОХМАЛЮ: КОРЕЛЯЦІЯ МІЖ МЕТОДОЛОГІЄЮ НІТРУВАННЯ, СТРУКТУРНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ У КОНТЕКСТІ СТВОРЕННЯ ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

У роботі проведено порівняльний аналіз класичних та сучасних методів синтезу нітрокрохмалю. Наголошено на ключових перевагах та недоліках кожного підходу, зокрема, впливі складу нітруючої суміші на ступінь нітрування та стабільність кінцевого продукту. Представлено результати власного експерименту з нітрування кукурудзяного та картопляного крохмалю за допомогою суміші нітроолеуму (із вмістом NO_2 3-20%) та сірчаної кислоти. Встановлено, що запропонований метод дозволяє отримати нітрокрохмаль з високим вмістом азоту (12,6-12,9%) та задовільною хімічною стійкістю. Доведено, що метод із застосуванням нітроолеуму є найбільш ефективним для отримання високоякісного продукту. Досліджено вплив різних методів стабілізації (кисла та лужна варка, промивання) на термічну стабільність нітрокрохмалю, що оцінювалася за температурою початку активного розкладання. Визначено перспективи використання отриманого нітрокрохмалю у складі високоенергетичних композицій.

Ключові слова: нітрокрохмаль, нітрування, нітроолеум, ступінь нітрування, хімічна стійкість, високоенергетичні матеріали.

S.M. Pleskun, Yu.P. Dyagilev, H.A. Bagliuk, Ye.V. Polunkin

SYNTHESIS OF NITROSTARCH: CORRELATION BETWEEN NITRATION METHODOLOGY, STRUCTURAL CHARACTERISTICS, AND FUNCTIONAL PROPERTIES IN THE CONTEXT OF DEVELOPING HIGH-ENERGETIC MATERIALS

This study presents a comprehensive investigation into the synthesis of nitrostarch, focusing on the correlation between nitration methodology, the resulting structural characteristics, and the functional properties critical for its application in high-energy materials. A comparative analysis of classical nitration methods using mixed acid ($\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{SO}_4$) and a modern approach employing nitrating oleum (with a free NO_2 content of 3-20%) in combination with sulfuric acid was conducted. The research highlights the significant influence of the nitrating agent's composition on the degree of esterification, molecular degradation, and ultimately, the thermal stability of the final product. Experimental work involved the nitration of corn and potato starch under controlled conditions. The oleum-based method was found to be superior, enabling the production of nitrostarch with a high nitrogen content (12.6-12.9%), indicative of a high degree of substitution, while minimizing destructive side reactions and preserving the integrity of the polymer chain. Furthermore, the impact of various post-synthesis stabilization techniques, including acid boil, alkaline boil, and washing procedures, was systematically evaluated. The results demonstrate the strong structure-property relationships in nitrostarch and confirm its significant potential as a sustainable and effective component for modifying the burning rate and mechanical properties of advanced high-energetic compositions, thereby contributing to the diversification of raw material sources for the defense and aerospace industries.

Keywords: nitrostarch, nitration, nitrating oleum, degree of substitution, thermal stability, high-energetic materials, structure-property relationships.

Вступ. Забезпечення стійкого, передбачуваного та технологічно керованого постачання високоенергетичних полімерів є ключовою передумовою для надійного функціонування оборонно-промислового комплексу та розвитку сучасних високоенергетичних матеріалів [1]. Традиційно основу таких композицій становить нітроцелюлоза [2], однак сучасні виклики – від геополітичних ризиків і логістичних збоїв до екологічних вимог і потреб у диверсифікації сировинної бази – стимулюють пошук альтернативних або комплементарних рішень. У цьому контексті пошук методів синтезу високоенергетичних матеріалів на основі вітчизняної сировини для України набуває стратегічного значення. Країна має потужний аграрний сектор із значними обсягами виробництва крохмалевмісних культур. Згідно з даними Державної служби статистики України, щорічний урожай картоплі перевищує 20 млн тон, кукурудзи – понад 30 млн тон [16], що створює надійну сировинну базу для організації повного циклу виробництва – від первинної сировини до готових високоенергетичних продуктів.

Нітрокрохмаль (НКр) [3] як нітроестер біополімерної природи привертає увагу завдяки поєднанню ключових переваг: доступності крохмалевмісної сировини, відновлюваності її походження, потенціалу керувати енергетичними характеристиками матеріалу через ступінь нітрування й морфологію частинок, а також можливості організації повного виробничого циклу в межах країни. Розробка ефективних методів синтезу НКр дозволить не лише зменшити імпортозалежність у критичній галузі, але й створити додаткові ланки доданої вартості в

агропромислового комплексу, сприяючи імпортозаміщенню та технологічному суверенітету. Враховуючи значний науковий потенціал України у галузі хімії та матеріалознавства, а також наявність потужного аграрного сектору, дослідження в області синтезу та застосування нітрокрохмалю є не лише науково-технічною задачею, але й важливим кроком у забезпеченні національної безпеки та розвитку високотехнологічних галузей промисловості.

Постановка проблеми. Незважаючи на потенційні переваги нітрокрохмалю як перспективного енергетичного матеріалу, його широке промислове застосування стикається з низкою фундаментальних науково-технічних проблем, що вимагають комплексного вирішення. Основна проблема полягає у складності контролю процесу нітрування полісахаридної матриці крохмалю, яка характеризується гетерогенною будовою з чергуванням аморфних та кристалічних ділянок [7]. Ця структурна особливість обумовлює нерівномірність протікання реакції етерифікації, що призводить до утворення продукту з неоднорідним розподілом нітрогруп по макромолекулі [5]. Як наслідок, важко досягти відтворюваного ступеня заміщення (DS) та відповідної масової частки азоту (w_n), які безпосередньо визначають енергоємність матеріалу. Ключовою проблемою є також поєднання високого ступеню нітрування зі збереженням структурної цілісності полімерного ланцюга. Агресивні умови традиційного нітрування нітруючою сумішшю ($\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{SO}_4$) призводять до значних процесів деполімеризації та окиснення, що погіршує механічні властивості продукту та його термостабільність [3, 9]. Іншим критичним аспектом є забезпечення довгострокової хімічної стабільності нітрокрохмалю. Залишкові кислоти, сульфоефіри та інші проміжні сполуки, що утворюються під час синтезу, можуть каталізувати автокаталітичне розкладання продукту під час зберігання [4, 10]. Існуючі методи стабілізації (промивання, "лужна варка") не завжди забезпечують повне видалення цих каталітичних домішок, що становить серйозну перешкоду для безпечного застосування. З точки зору матеріалознавства, актуальною проблемою залишається керування морфологією частинок нітрокрохмалю (питомою поверхнею, пористістю, гранулометричним складом), що суттєво впливає на його подальшу переробку та властивості у складі високоенергетичних композицій [6]. Недостатньо вивченим є питання сумісності нітрокрохмалю з іншими компонентами пропелентів та високоенергетичних композицій, зокрема, з пластифікаторами, стабілізаторами та окиснювачами. Таким чином, розробка ефективного методу синтезу нітрокрохмалю, який би дозволяв отримувати продукт із заданими характеристиками (високий w_n , низька зольність, висока термостабільність, контрольована морфологія) та був прийнятним з економічної та екологічної точок зору, є актуальною науково-технічною задачею. Її вирішення відкриває перспективи для створення нових поколінь високоефективних та безпечних енергетичних матеріалів на основі вітчизняної сировини.

Постановка завдань. Провести порівняльний аналіз методів синтезу нітрокрохмалю, експериментально дослідити ефективність нітрування сумішшю нітроолеуму та сірчаної кислоти, вивчити вплив способу стабілізації на властивості продукту та обґрунтувати перспективи його використання.

Матеріали та методи дослідження. Вихідні матеріали. Для синтезу використовували кукурудзяний та картопляний крохмаль, що відповідає ДСТУ 4286-2004. Як нітрувальне середовище застосовували суміш нітроолеуму (з масовою часткою вільного NO_2 від 3% до 27%) та концентрованої сірчаної кислоти (96-98%). Модуль нітрування (співвідношення об'єму нітрувальної суміші до маси крохмалю) становив 30. Співвідношення H_2SO_4 /нітроолеум у суміші підтримували на рівні 3,0, а вміст воли в нітрувальному середовищі контролювали в межах 4-6%.

Методика синтезу. Нітрування проводили у скляному реакторі на 500 мл, оснащеному механічною мішалкою, зворотним холодильником, термометром та водяною банею з терморегуляцією. Попередньо очищений та висушений крохмаль (10 г) завантажували в охолоджену до 10°C нітрувальну суміш (200 мл). Процес вели протягом 60 хвилин при інтенсивному перемішуванні. Після завершення реакційну масу виливали у воду із льодом (30-кратний об'єм). Осад відфільтровували та промивали за різними схемами стабілізації.

Методи стабілізації. Досліджування проводились п'ятьма варіантами, після стабілізації продукт сушили при $55-60^\circ\text{C}$ до постійної маси:

1. Промивання гарячою (95°C), а потім холодною водою.
2. Промивання гарячим 0,03% розчином NaHCO_3 , потім холодною водою.
3. Кип'ятіння у воді з залишковою кислотою («кисла варка») та промивання.
4. Кип'ятіння у лужному розчині («лужна варка») та промивання.
5. Поєднання варок за схемою 3 та 4.

Методи аналізу. Вміст азоту визначали об'ємним методом. Термічну стабільність оцінювали на дериватографі «Термоскан-2» за температурою початку активного екзотермічного розкладання (t_p). Нагрів проводили зі швидкістю $5^\circ\text{C}/\text{хв}$ у повітряному середовищі.

Порівняльний аналіз методів синтезу нітрокрохмалю. Синтез нітрокрохмалю є складною технологічною задачею, що пов'язана з особливостями структури крохмалю та необхідністю збереження його полімерного каркасу. Існує кілька основних методів нітрування, кожен з яких має специфічні переваги та недоліки [1, 3, 11]. Класичний метод з використанням нітруючої суміші ($\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{SO}_4$) є найбільш поширеним у промисловості. Його основна перевага - висока ефективність нітрування та відносна простота технології [2]. Однак цей метод має суттєві недоліки: інтенсивна деполімеризація макромолекули крохмалю під дією сильної сірчаної кислоти призводить до зниження молекулярної маси та погіршення механічних властивостей продукту [3]. Крім того, утворення сульфоефірів як побічних продуктів значно ускладнює процес стабілізації та знижує термічну стабільність кінцевого продукту [5]. Метод з використанням нітроолеуму як джерела нітроній-катионів (NO_2^+) є перспективною альтернативою. Перевага цього методу полягає в меншій дегідратуючій здатності середовища, оскільки основну роль відіграє безпосередньо нітруючий агент [6]. Це дозволяє зменшити деструкцію полімерного ланцюга та отримати продукт з більш високою молекулярною масою. За даними в наукових роботах [11, 12], оптимальний вміст вільного NO_2 в нітроолеумі становить 15-20%, що забезпечує ступінь нітрування до 12,9% азоту. Метод з використанням азотної кислоти з оцтовим ангідридом ($(\text{CH}_3\text{CO})_2\text{O}$) дозволяє проводити нітрування в менш агресивному середовищі. Цей метод забезпечує високу селективність та мінімізацію побічних реакцій, але є економічно менш вигідним через високу вартість [7]. Нітрування оксидом N_2O_5 є найбільш сучасним методом, який забезпечує високу чистоту продукту та мінімальну деструкцію полімерного ланцюга [6]. Однак висока вартість та необхідність спеціального обладнання обмежують його промислове застосування.

Проблеми хімічної стабілізації нітрокрохмалю. Стабілізація нітрокрохмалю є критично важливим етапом, оскільки наявність залишкових кислот та інших домішок може призводити до каталітичного розкладання продукту під час зберігання [4, 14]. Основні проблеми включають:

1. Видалення залишкових мінеральних кислот - найбільш ефективним методом є "лужна варка", яка дозволяє нейтралізувати кислоти та гідролізувати нестійкі сульфоефіри [14].
2. Стабілізація ацетальних зв'язків - на відміну від нітроцелюлози, нітрокрохмаль містить ацетальні зв'язки, які більш схильні до гідролізу, що вимагає додаткових заходів стабілізації [8].
3. Контроль молекулярної маси - деполімеризація під час нітрування може призводити до утворення низькомолекулярних фракцій, які знижують стабільність продукту [9].

Табл. 1.

Порівняльна характеристика методів синтезу нітрокрохмалю

Метод синтезу	Ступінь нітрування (% N)	Стабільність кінцевого продукту	Технологічна складність	Собівартість
$\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{SO}_4$	10,5-12,0	Низька	Середня	Низька
Нітроолеум	12,0-13,0	Середня	Середня	Середня
$\text{HNO}_3/(\text{CH}_3\text{CO})_2\text{O}$	12,5-13,5	Висока	Висока	Висока
N_2O_5	13,0-14,0	Дуже висока	Дуже висока	Дуже висока

Таблиця 1 ілюструє, що метод з використанням нітроолеуму є оптимальним компромісом між якістю продукту та технологічною доцільністю. Відомі дослідження [13] показали, що термічна стабільність нітрокрохмалю, синтезованого за цим методом, може досягати $185\text{--}190^\circ\text{C}$ при правильній стабілізації. Насамперед вибір методу синтезу повинен враховувати не тільки економічні фактори, але й вимоги до якості та стабільності кінцевого продукту, особливо при його використанні у високоенергетичних матеріалах.

Результати експериментального синтезу. Експериментально доведено, що використання нітроолеуму дозволяє ефективно нітрувати як кукурудзяний, так і картопляний крохмаль. Вміст азоту в отриманих продуктах становив 12,6–12,9%, що відповідає високому ступеню заміщення. Оптимальні результати спостерігалися при використанні нітроолеуму з вмістом NO_2 у діапазоні 15–20%. При нижчих концентраціях (3-10%) ступінь нітрування був недостатнім, а при вищих (понад 20%) посилювалися побічні процеси окиснення. Критичним етапом є стабілізація продукту. Результати дослідження різних методів промивання наведено в таблиці 2.

Табл. 2.

Вплив методу стабілізації на температуру початку розкладання (t_p) нітрокрохмалю

Метод стабілізації	t_p , °C	Примітки
1. Гаряча + холодна вода	165-170	Лакмус слабо-кислий
2. Лужний розчин + вода	175-180	Лакмус нейтральний
3. Кисла варка	155-160	Лакмус кислий
4. Лужна варка	185-190	Лакмус нейтральний
5. Кисла + лужна варка	180-185	Лакмус нейтральний

Як видно з таблиці 2, найвищу термічну стабільність забезпечує метод «лужної варки» ($t_p = 185\text{--}190^\circ\text{C}$). Це пояснюється повним видаленням залишкових кислот, які каталізують термоокиснювальний розклад продукту. Промивання лише водою (метод 1) не забезпечує повної нейтралізації, про що свідчить слабе підкислення лакмусу. «Кисла варка» (метод 3), навпаки, призводить до найнижчої стабільності через підвищення кислотності середовища. Дериватографічний аналіз зразка, стабілізованого «лужною варкою», показав чіткий екзотермічний пік розкладання в діапазоні $185\text{--}220^\circ\text{C}$, що підтверджує його придатність для подальшого застосування.

Аналіз фізико-хімічних властивостей синтезованого нітрокрохмалю. Для комплексної оцінки якості отриманого продукту було проведено аналіз основних фізико-хімічних показників нітрокрохмалю, синтезованого в оптимальних умовах (нітроолеум з 20% NO_2 , стабілізація «лужною варкою»). Результати порівняно з очікуваними значеннями та відповідними стандартами наведено в таблиці 3.

Табл. 3.

Отримані фізико-хімічні показники синтезованого нітрокрохмалю

Фізико-хімічні показники	Очікуване значення	Отримане значення	Похибка	Відповідність	Стандарт
Об'ємна концентрація окису азоту, мл NO /гр або % (мас)	189-194,5	11,87-11,68	0,01	Відповідає	ГОСТ 9197 **
Розчинність в етиловому спирті, %, не більше	10	4,5	0,1	Відповідає	ГОСТ 5766 **
Розчинність у спирто-ефірній суміші, %, не менше	98	99,8	0,1	Відповідає	ГОСТ 5766 **
В'язкість умовна, °Е *	1,9-3,0	2,88	0,1	Відповідає	*
Лужність, %, не більше	Не більше 0,2	0,1	0,1	Відповідає	ДСТУ ISO 9963-1:2007
Масова частка золи, %, не більше	Не більше 0,5	0	0,01	Відповідає	ГОСТ 5768 ***
Масова частка вологи, %, не менше	Не менше 25	29,2	0,1	Відповідає	ГОСТ 9196 ***
Ступінь подрібнення min.	Не більше 0,2	0,01	0,01	Відповідає	залишок на ситі 063, %, не більше
Ступінь подрібнення max.	Не більше 2,0-7,0	0,01	0,01	Відповідає	залишок на ситі 016, %, не більше

Аналіз даних з таблиці 3 засвідчує високу якість та стандартизацію отриманого нітрокрохмалю. Низька розчинність в етиловому спирті (4,5% при нормі $\leq 10\%$) та висока розчинність у спирто-ефірній суміші (99,8% при нормі $\geq 98\%$) підтверджують високий ступінь нітрування та типологічну подібність отриманого продукту до нітроцелюлози високої в'язкості [2]. Значення умовної в'язкості (2,88 °Е) знаходиться в середині очікуваного діапазону (1,9-3,0 °Е), що вказує на відсутність значної деполімеризації під час синтезу та на наявність довгих полімерних ланцюгів, що важливо для формування міцних плівок у складі пропелентів [3]. Критично важливі

для подальшого безпечного застосування показники чистоти продукту – лужність (0,1% при нормі $\leq 0,2\%$) та масова частка золи (0% при нормі $\leq 0,5\%$) – свідчать про ефективність обраного методу стабілізації («лужна варка»). Це підтверджує повне видалення залишкових кислот та мінеральних домішок, що є запорукою довготривалої термостабільності матеріалу [5]. Вологість продукту (29,2%) перевищує мінімально необхідний рівень (25%), що є позитивним фактором для зниження його чутливості до механічних впливів при зберіганні та транспортуванні [2]. Гранулометричний склад (ступінь подрібнення) значно кращий за нормативні вимоги, що забезпечує хорошу сипучість та однорідність при змішуванні з іншими компонентами енергетичних композицій [4].

Висновки. На підставі порівняльного аналізу доведено, що метод синтезу нітрокрохмалю з використанням нітроолеум-сірчаної системи (15–20% NO_2 , співвідношення $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{олеум} = 3$) є оптимальним, оскільки забезпечує високий ступінь нітрування ($w_n \approx 12,9\%$) при мінімальній деструкції полімерного ланцюга. Встановлено, що термоокиснювальна стабільність НКр критично залежить від ефективності стабілізації. Найбільш ефективним методом є «лужна варка», яка підвищує температуру початку розкладання до 185–190 °С шляхом повного видалення кислотних каталізаторів розкладання. Комплексний аналіз фізико-хімічних властивостей синтезованого нітрокрохмалю підтвердив його високу якість та повну відповідність нормативним вимогам за такими ключовими показниками: в'язкість, розчинність, низька зольність та лужність, що свідчить про ефективність застосованої методики очищення та стабілізації. Отриманий високостійкий нітрокрохмаль з заданими структурними параметрами є перспективним об'єктом для подальших досліджень щодо його застосування як енергетичного модифікатора в композиціях ВЕМ, зокрема для регулювання швидкості горіння та механічних властивостей зарядів. Перспективи подальших досліджень включають вивчення кінетики термічного розкладання отриманих зразків, дослідження їх реологічної поведінки в полімерних матрицях та оцінку сумісності з іншими компонентами ВЕМ. Перспективним напрямом є також дослідження впливу типу крохмалю (співвідношення амілози/амілопектину) на властивості кінцевого продукту.

Список використаних джерел.

1. Urbanski, T. Chemistry and Technology of Explosives. Vol. I–IV. Pergamon Press, 1964–1984.
2. Meyer, R., Köhler, J., Homburg, A. Explosives. 6th Edition. Wiley-VCH, 2007.
3. Agrawal, J. P. High Energy Materials: Propellants, Explosives and Pyrotechnics. Wiley-VCH, 2010.
4. Fedoroff, B. T., Sheffield, O. E. Encyclopedia of Explosives and Related Items. US Army ARDEC, 1980.
5. Klapötke, T. M. Chemistry of High-Energy Materials. 4th Edition. De Gruyter, 2019.
6. Nielsen, A. T. "Nitration with Dinitrogen Pentoxide." Journal of Organic Chemistry, 1958, 23 (4), 460–471.
7. Rybak, M., et al. "Structural and Thermal Properties of Nitrated Starch." Journal of Energetic Materials, 2016, 34(2), 123–138.
8. Мацуленко, О. І., Бондар, С. В. "Нітроестери біополімерів як енергетичні матеріали". Хімія і технологія вибухових речовин, 2019, №2, с. 25–34.
9. Ахметов, А. А. "Фізико-хімічні основи синтезу нітроестерових полімерів". Вибухові речовини та пропеленти, 2015.
10. Руденко, М. В., Савчук, В. І. "Екологічні аспекти синтезу нітроестерів". Хімічна технологія, 2020, №4, с. 41–48.
11. Лукашов, О. М., Коваленко, В. Л. "Синтез та властивості нітрованих похідних полісахаридів". Вісник Сумського державного університету. Серія Хімічні науки та технології, 2017, №1, с. 45–52.
12. Лукашов, О. М., Петренко, О. С. "Кінетика нітрування крохмалю в нітроолеумних системах". Наукові вісті НТУУ "КПІ", 2018, №5, с. 78–85.
13. Lukashov, O., Kovalchuk, I. "Thermal Decomposition of Nitrated Polysaccharides". Central European Journal of Energetic Materials, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 456–470.
14. Лукашов, О. М., Бойко, М. І. "Оптимізація умов стабілізації нітрокрохмалю". Хімія, технологія речовин та їх застосування, 2020, №3, с. 112–118.
15. ДСТУ 4286–2004. Крохмаль. Загальні технічні умови.
16. Державна служба статистики України. Сільське господарство України 2021. Київ, 2022. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua/>

С.М. Баранович¹, І.Г. Стукалець¹, С.В. Коробка¹, М.І. Бабич¹,
М.М. Толстушко², Н.О. Толстушко²

¹Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій
імені С.З. Гжицького.

²Луцький національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОГАЗОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ЗАКРИТИХ ПЕРЕПУСКНИХ КАНАЛАХ КРУГЛОГО ТА ТРИКУТНОГО ПЕРЕРІЗУ

Розглянуто різні методи аналізу гідрогазодинамічних процесів у закритих перепускних каналах з круглою і трикутною формою поперечного перерізу. Одним з використаних підходів був аналітичний метод, який передбачав складні математичні обчислення та подальшу візуалізацію процесів за допомогою системи MATLAB. Цей підхід дав змогу детально дослідити характеристики каналу та відтворити явища ламінарного потоку рідин і газів, що дозволило глибше зрозуміти їхні фізичні особливості.

Інший метод полягав у використанні імітаційного комп'ютерного моделювання процесів ламінарного потоку рідини та газу через канали з круглою та трикутною формою поперечного перерізу за допомогою програмного забезпечення SOLIDWORKS Flow Simulation. Для реалізації цього підходу були задані необхідні вхідні параметри та умови, а отримані результати піддалися детальному аналізу та інтерпретації. Цей метод дозволив створювати високоточні комп'ютерні моделі гідрогазодинамічних процесів, що дало змогу глибше дослідити їхню поведінку та взаємодію в умовах різноманітних форм поперечних перерізів каналів.

Порівняння результатів, отриманих за допомогою обох методів, підтвердило їхню здатність адекватно моделювати гідрогазодинамічні процеси в закритих перепускних каналах з круглою та трикутною формою поперечного перерізу. Дані, що були отримані, не лише підтвердили точність вибраних методів, але й дозволили глибше зрозуміти механізми перетікання рідин та газів за умови ламінарного руху. Це дослідження відкриває нові можливості для подальших наукових розробок у галузі гідрогазодинаміки і має потенціал для застосування в інженерних розрахунках, де важливими є висока точність, достовірність і надійність моделей гідрогазодинамічних процесів.

Ключові слова: гідрогазодинаміка, технологічний канал, система MATLAB, SOLIDWORKS Flow Simulation.

S. Baranovych, I. Stukalets, S. Korobka, M. Babych, M. Tolstushko, N. Tolstushko

STUDY OF HYDRO-GAS-DYNAMIC PROCESSES IN CLOSED BYPASS CHANNELS WITH CIRCULAR AND TRIANGULAR CROSS-SECTIONS

The study examines various methods for analyzing hydrogasodynamic processes in closed bypass channels with circular and triangular cross-sections. One of the approaches used was the analytical method, which involved complex mathematical calculations followed by process visualization using the MATLAB system. This approach enabled a detailed investigation of the channel characteristics and the reproduction of laminar flow phenomena of liquids and gases, allowing for a deeper understanding of their physical features.

Another method involved the use of simulation-based computer modeling of the laminar flow of liquid and gas through channels with circular and triangular cross-sections using SOLIDWORKS Flow Simulation software. To implement this approach, the necessary input parameters and conditions were specified, and the resulting data were subjected to detailed analysis and interpretation. This method allowed for the creation of highly accurate computer models of hydrogasodynamic processes, facilitating a deeper exploration of their behavior and interaction under various cross-sectional shapes of the channels.

A comparison of the results obtained from both methods confirmed their ability to adequately model hydrogasodynamic processes in closed bypass channels with circular and triangular cross-sections. The data obtained not only validated the accuracy of the chosen methods but also provided a deeper understanding of the mechanisms of liquid and gas flow under laminar conditions. This research opens new opportunities for further scientific developments in the field of hydrogasodynamics and has the potential for application in engineering calculations where high precision, reliability, and credibility of hydrogasodynamic models are crucial.

Key words: hydrogas dynamics, technological channel, MATLAB system, SOLIDWORKS Flow Simulation.

Постановка проблеми. Теоретичні основи визначення продуктивності довгих закритих каналів з ламінарним потоком рідин і газів базуються на коефіцієнті Пуазейля, розробленому для каналів круглого поперечного перерізу. Однак на практиці закриті канали, які з'єднують камери елементів різних конструкцій механізмів і машин, часто мають трикутну або прямокутну форму перерізу. Тому теорія перетікання через такі канали потребує додаткового уточнення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проаналізувавши теоретичні основи перехідних процесів у розрахунках закритих технологічних каналів, можна відзначити, що застосовують K_p – коефіцієнт Пуазейля [3, 4, 8, 10, 11], який визначається за формулою:

© С.М. Баранович, І.Г. Стукалець, С.В. Коробка, М.І. Бабич,
М.М. Толстушко, Н.О. Толстушко

$$K_p = \frac{\pi D^4}{128 \eta l}, \quad (1)$$

де D – діаметр каналу, м; l – довжина каналу, м; η – коефіцієнт в'язкості, Па·с.

Застосування цього коефіцієнта для розрахунку гідрогазодинамічних характеристик закритих технологічних каналів є коректним лише для каналів круглого поперечного перерізу. Для інших форм перерізів необхідні додаткові дослідження.

Постановка завдання. Для обчислення гідрогазодинамічних характеристик закритих технологічних каналів застосовуються формули, що включають коефіцієнт Пуазейля, який обчислюється за виразом (1) і передбачає потік рідин та газів через канали круглого поперечного перерізу. Проте на практиці технологічні канали в конструкціях часто виконуються з квадратними, прямокутними, трикутними або іншими формами перерізів, оскільки їх виготовлення є більш простим і економічно вигідним. Тому виникає необхідність розроблення та вивчення методів визначення гідрогазодинамічних характеристик для закритих каналів різних геометричних перерізів.

Викладення основного матеріалу. Здійснимо розрахунки гідрогазодинамічних характеристик для каналів круглого та трикутного поперечного перерізу [6, 11]. Визначимо швидкість потоку та продуктивність перетікання рідин і газів. Для рівняння пропускної здатності каналів різних форм припустимо, що їх площі перерізів A є рівними.

Для каналу круглого перерізу (рис. 1.) диференціальне рівняння Нав'є-Стокса у полярній системі координат, враховуючи симетрію [1, 2], матиме вигляд:

$$\frac{d^2 g}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dg}{dr} = -k, \quad (2)$$

де $k = \frac{1}{\eta} \frac{dp}{dx}$; η – динамічна в'язкість рідини (газу), Па·с; p – тиск рідини (газу), Па; g – швидкість перетікання рідин і газів по каналу, м/с.

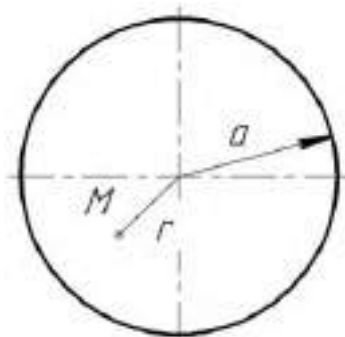


Рис. 1. Розрахункова схема для визначення швидкості руху рідин і газів каналом круглого перерізу

Розв'язок рівняння 1 матиме наступний вигляд:

$$g = -\frac{k \cdot r^2}{4} + C_1 \ln r + C_2. \quad (3)$$

де C_1 , C_2 – числові сталі, які за належно вибраних значень, дають будь-який частковий розв'язок.

Оскільки швидкість обмежена, то $C_1 = 0$, а значення сталої C_2 знаходимо з граничної умови, при $r = a$ $g = 0 \rightarrow C_2 = \frac{k \cdot a^2}{4}$.

Отже,

$$g = \frac{k}{4} (a^2 - r^2). \quad (4)$$

Тоді продуктивність

$$Q = \iint_A \rho v dA = \int_0^a \frac{k\rho}{4} (a^2 - r^2) \cdot 2\pi r dr =$$

$$= \frac{\pi k \rho}{r} \left(\frac{a^2 r^2}{2} - \frac{r^4}{4} \right) \Big|_0^a = \frac{\pi k \rho a^4}{8}. \quad (5)$$

Тоді радіус каналу круглого перерізу $\frac{a^2}{\sqrt{\pi}}$ і його пропускна здатність

$$Q = \frac{k \rho a^4}{8\pi} = 0,0398 k \rho a^4. \quad (6)$$

Розподіл зміни швидкості руху рідин і газів каналом круглого перерізу зображено на рис. 3.

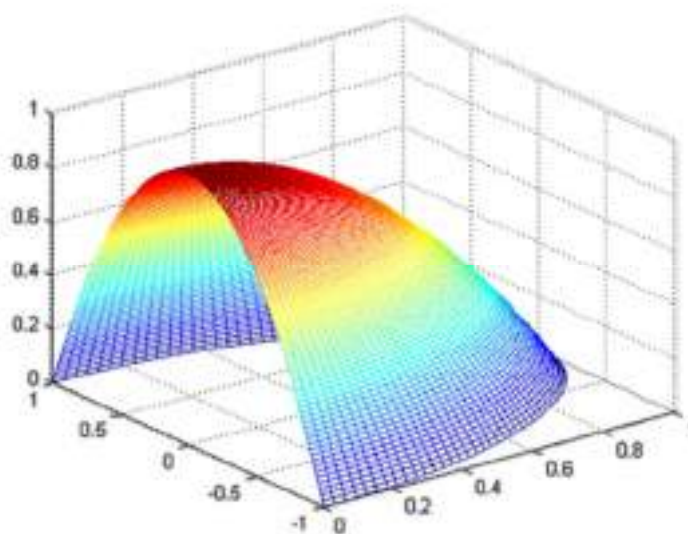


Рис. 2. Графік розподілу швидкості каналом круглого перерізу в системі *MATLAB*

Для каналу трикутного перерізу, використаємо розрахункову схему (рис. 3):

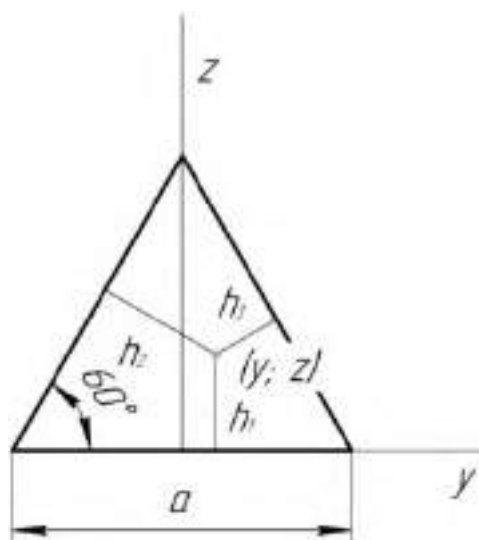


Рис. 3. Розрахункова схема для визначення швидкості руху рідин і газів каналом трикутного перерізу

Висоти, опущені з довільної точки трикутника на його сторони, визначаються, як:

$$h_1 = z;$$

$$h_2 = \frac{\sqrt{3}a}{4} + \frac{\sqrt{3}}{2}y - \frac{1}{2}z; \quad (7)$$

$$h_3 = \frac{\sqrt{3}a}{4} - \frac{\sqrt{3}}{2}y - \frac{1}{2}z.$$

Рівняння швидкості руху повітря матиме такий вигляд:

$$\vartheta = \frac{\Delta p}{l} \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{h_1 \cdot h_2 \cdot h_3}{a \cdot \eta} = kz \left(\frac{3}{16}a^2 - \frac{3}{4}y^2 + \frac{1}{4}z^2 - \frac{\sqrt{3}a}{4}z \right). \quad (8)$$

Тоді продуктивність:

$$\begin{aligned} Q &= \iint_A \rho \vartheta dy dz = 2k \int_0^{\frac{a}{2}} \rho dy \int_0^{\frac{\sqrt{3}}{2}a - \sqrt{3}y} \left(\frac{3}{16}a^2 z - \frac{3}{4}y^2 z + \frac{1}{4}z^3 - \frac{\sqrt{3}a}{4}z^2 \right) dz = \\ &= 2k\rho \int_0^{\frac{a}{2}} dy \left(\frac{3}{32}a^2 z^2 - \frac{3}{8}y^2 z^2 + \frac{1}{16}z^4 - \frac{\sqrt{3}a}{12}z^3 \right) \Bigg|_0^{\frac{\sqrt{3}}{2}a - \sqrt{3}y} = \\ &= 2k\rho \int_0^{\frac{a}{2}} \frac{9a^2}{32} \left(\left(\frac{a}{2} - y \right)^2 - \frac{9}{8}y^2 \left(\frac{a}{2} - y \right)^2 + \frac{9}{16} \left(\frac{a}{2} - y \right)^4 - \frac{9}{12}a \left(\frac{a}{2} - y \right)^3 \right) dy = \\ &= 2k\rho \left(-\frac{3a^2}{32} \left(\frac{a}{2} - y \right)^3 - \frac{9}{8} \left(\frac{a^2}{4} \frac{y^3}{3} - a \frac{y^4}{4} + \frac{y^5}{5} \right) - \frac{9}{16 \cdot 5} \left(\frac{a}{2} - y \right)^5 + \frac{9}{12}a \left(\frac{a}{2} - y \right)^4 \cdot \frac{1}{4} \right) \Bigg|_0^{\frac{a}{2}} = \\ &= 2k\rho a^5 \left(\frac{3}{32 \cdot 8} + \frac{9}{80} \cdot \frac{1}{32} - \frac{9}{8} \left(\frac{1}{4} \cdot \frac{1}{24} - \frac{1}{64} + \frac{1}{160} \right) - \frac{9}{48} \cdot \frac{1}{16} \right) = k\rho a^5 \cdot \frac{3}{640}. \end{aligned} \quad (9)$$

З попередньо записаної умови про те, що площі перерізів однакові та дорівнюють $A = a^2$, сторона каналу трикутного перерізу дорівнює $\frac{2a}{\sqrt{3}}$ і пропускна здатність:

$$Q = \frac{\sqrt{3}k\rho 16a^4}{320 \cdot 3} = \frac{k\rho a^4}{20\sqrt{3}} = 0,0289k\rho a^4. \quad (10)$$

Залежність зміни швидкості руху повітря з трикутним перерізом каналу зображена на рис. 4.

Розрахунки показують, що для виразу суми достатньо використати лише два або три доданки. Це підтверджується програмою, розробленою в середовищі MATLAB.

Розроблені рівняння забезпечують більш точне визначення гідрогазодинамічних процесів у перепускних каналах з різними поперечними перерізами, що застосовуються в технічних системах.

Метод імітаційного моделювання гідрогазодинамічних процесів у середовищі SOLIDWORKS Flow Simulation [9, 12, 13] включає кілька етапів. Спочатку створюється тривимірна геометрична модель каналу з визначеним поперечним перерізом, потім задається область дослідження, обмежена об'ємом каналу. Наступним кроком є задання вхідних параметрів процесу, таких як швидкість або об'ємні характеристики, а також умов для моделювання. Твердотілу модель перетворюють у сітку скінченних елементів, задаючи розмір елементів, що забезпечить необхідну точність результатів. Цілі дослідження задаються в залежності від потрібних результатів. Завершальним етапом є аналіз отриманих результатів і їх інтерпретація. Для візуалізації результатів використовуються діаграми, як показано на рис. 5, 6.

Як видно, описані вище методи демонструють практично однакові результати у відтворенні гідрогазодинамічних процесів у закритих перепускних каналах.

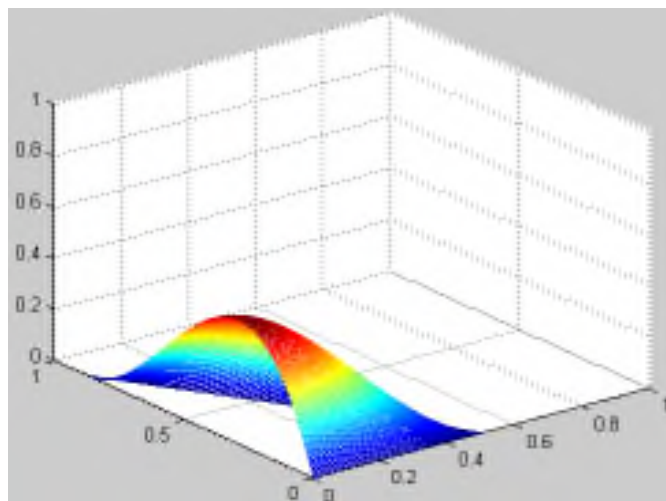


Рис. 4. Графік розподілу швидкості каналом трикутного перерізу в системі MATLAB

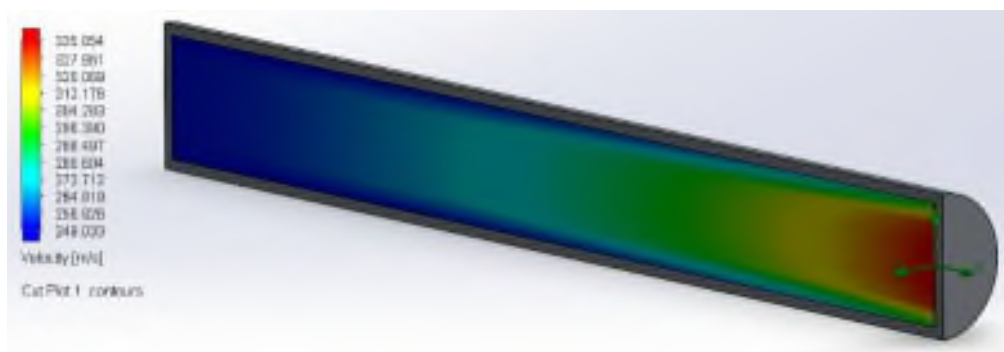


Рис. 5. Діаграма розподілу швидкості каналом круглого перерізу з використанням модуля *Flow Simulation* системи *SOLIDWORKS*

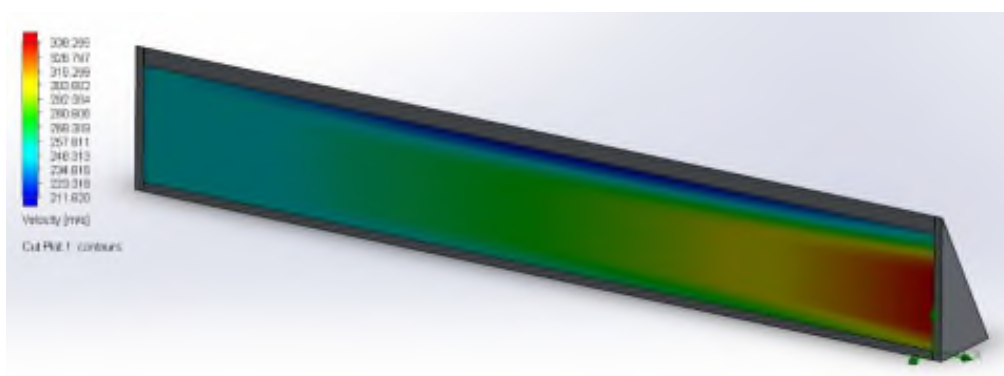


Рис. 6. Діаграма розподілу швидкості каналом трикутного перерізу з використанням модуля *Flow Simulation* системи *SOLIDWORKS*

Висновки. Встановлено залежності, що описують вплив геометричних параметрів перерізу перепускних каналів на гідрогазодинамічні процеси, що сприяють підвищенню точності визначення характеристик роботи закритих каналів.

Порівняння отриманих залежностей гідрогазодинамічних характеристик роботи перепускних каналів у системах MATLAB та SOLIDWORKS Flow Simulation демонструє схожість динамічних залежностей в обох випадках, що дозволяє їх використовувати під час проектування виробів, що містять перепускні канали закритого типу.

Список використаних джерел

1. Баранович С.М. Обґрунтування параметрів пульсатора доїльного апарата з регульованою тривалістю такту ссання: дис. ... канд. техн. наук. Львів, 2015. 165 с.

© С.М. Баранович, І.Г. Стукалець, С.В. Коробка, М.І. Бабич,
М.М. Толстушко, Н.О. Толстушко

2. Баранович С., Стукалець І., Шеремета Р., Коробка С., Бабич М.. Методики дослідження гідрогазодинамічних процесів у закритих перепускних каналах різного перерізу. Вісник Львівського національного університету природокористування. Серія Агроінженерні дослідження, (27), 108–112. <https://doi.org/10.31734/agroengineering2023.27.108>.
3. Константинов Ю. М. Технічна механіка рідини і газу [Підручник] / Ю. М. Константинов, О. О. Гіжа. – К.: Вища школа, 2002. – 277 с.
4. Кулінченко В. Р. Гідравліка, гідравлічні машини і гідропривід: Підручник.-Київ: Фірма «Інкос», Центр навчальної літератури, 2006. — 616с.
5. Колчунов В. І. Теоретична та прикладна гідромеханіка: Навч. Посібник. — К.: НАУ, 2004. – 336 с.
6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. В 10 томах. -Том VI. - Гидродинамика. - М.: Наука, 1988. -736 с.
7. Лазарев Ю. Ф. Початки програмування у середовищі MatLAB: Навч. посібник. – К.: "Корнійчук", 1999. – 160 с.
8. Свирень Н. О. Приложение законов гидродинамики к особенностям пневматических высевающих аппаратов / Н. О. Свирень, Н. Н. Петренко // Збірник наукових праць Кіровоградського інституту сільськогосподарського машинобудування : Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – 1998. – № 2. – С. 177-180.
9. Стукалець І. Г. Основи інженерного аналізу технічних об'єктів. Курс лекцій для студентів інженерних спеціальностей. Львів : ЛНУП, 2022. – 109 с.
- 10.Цяпко М. Ф., Мамаєв Л. М. Гідрогазодинаміка – К.: ІСДМО, 1995 – 211 с.
- 11.Цяпко М. Ф., Яловий М. І., Павленко А. М. Гідрогазодинаміка – Дніпродзержинськ; ДДТУ, 2009. – 264 с.
- 12.An Introduction to Flow Analysis Applications with SolidWorks Flow Simulation, Student Guide : Dassault Systèmes SolidWorks Corporation, 2013. – 19 p.
- 13.SolidWorks, “SOLIDWORKS Flow Simulation,” Dassault Systemes. URL: <https://www.solidworks.com/sw/products/simulation/flow-simulation.htm>. (дата звернення: 15.05.2023).

Рецензент Дідух Володимир Федорович, доктор технічних наук, професор кафедри аграрної інженерії імені професора Г.А. Хайліса Луцького національного технічного університету, Заслужений діяч науки і техніки України.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАННЯ СТАТЕЙ

Стаття надсилається до редакції збірника у паперовому варіанті з підписами авторів на адресу: 43018, м. Луцьк, вул. Львівська 75, Луцький НТУ; в електронному вигляді у форматі MS WORD– на електронну адресу: naukovi-notatki@lutsk-ntu.com.ua. Обидва варіанти повинні бути ідентичними.

Наукова стаття обов'язково повинна мати наступні необхідні елементи: постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які спирається автор, виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття; формулювання цілей статті; виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів; висновки з даного дослідження і перспективи подальших досліджень у даному напрямку.

1. **Статтю можна подавати українською або англійською мовою.** Стаття повинна бути набрана у текстовому редакторі не нижче MS WORD 97/03 і надрукована тільки на лазерному або струйному принтері на білих листах формату А4 (297х210 мм). Нумерацію сторінок не виконувати. Обсяг статті від 4-9 сторінок.
2. Параметри сторінки: верхнє, нижнє та ліве поле – 2 см, праве поле 2,5 см. Від краю до колонтитула верхнього – 1,25 см, нижнього – 1,25 см.
3. Шапка статті: індекс УДК, ініціали та прізвища авторів розміщується на один абзац нижче шрифтом 11 пт, назва організації – набираються з нового рядка шрифтом Time New Roman Cyr розміром 11 пт з одинарним міжрядковим інтервалом і вирівнюються по центру. Назва статті розміщується на один абзац нижче назви організації, набирається шрифтом Time New Roman Cyr розміром 11 пт з напівжирним виділенням і вирівнюється по центру.
4. **Анотації** українською та англійською мовами набираються з абзацного відступу шрифтом Time New Roman Cyr розміром 9, курсив, напівжирний 300-500 друкованих знаків з одинарним міжрядковим інтервалом і вирівнюються по ширині; англійською мовами розширена анотація 700-1000 друкованих знаків.
5. Нижче анотацій обов'язково вказуються ключові слова шрифтом Time New Roman Cyr, курсив, напівжирний 9 пт.
6. Основний текст розміщується на 1 см нижче анотацій, набирається з абзацного відступу 1 см шрифтом Time New Roman Cyr розміром 11 пт з одинарним міжрядковим інтервалом і вирівнюється по ширині.
7. Для набирання формул застосовувати редактор формул MS WORD (використовувати шрифти: Symbol, Time New Roman Cyr; розміри шрифтів: звичайний 12 пт, крупний індекс 7 пт, дрібний індекс 5 пт, крупний символ 18 пт, дрібний символ 12 пт). Формула вирівнюється по центру і не повинна займати більше 5/6 ширини рядка.
8. Якщо в статті присутні ілюстрації, необхідно розташовувати їх по тексту, вирівнюючи підписи (*Рис. 1. Схема ...*) по ширині з абзацного відступу 1 см. Другий екземпляр ілюстрації необхідно подати на окремому листі. Ілюстрації повинні бути чіткими та контрастними.
9. Таблиці розташовувати по тексту, причому їх ширина повинна бути на 1 см менша ширини рядка. Над таблицею поставити її порядковий номер (*Табл. 1*) вирівнюючи по правому краю, під яким розмістити назву таблиці вирівнюючи по центру.

10. Література подається загальним списком в кінці рукопису згідно з вимогами державного стандарту через 1 см від останнього рядка.
11. **Обов'язково** подати статтю. на лазерному диску. Статті можна також пересилати електронною поштою за такою адресою: **naukovi-notatki@lutsk-ntu.com.ua**
12. До статті **обов'язково** додається **рецензія від** провідного вченого за науковим спрямуванням статті та **авторська довідка** у письмовому та електронному вигляді за вказаною формою:

Прізвище, Ім'я, По-батькові

Місце роботи, посада, науковий ступінь, вчене звання

Наукові інтереси, ORCID

Назва статті та особисті підписи усіх авторів

Адреса для листування, телефон, e-mail, контактну особу

14. В кінці статті обов'язково вказуються ПІБ, посаду, науковий ступінь, вчене звання рецензента статті.
15. Рукописи, що не відповідають вище вказаним вимогам, не розглядаються і до друку не приймаються.

ЗРАЗОК ОФОРМЛЕННЯ СТАТТІ

УДК: 620.179.16

І.І. Іванов¹, П.П. Петров²

Луцький національний технічний університет¹

Тернопільський національний технічний університет²

НАБЛИЖЕНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ОСІ КОНОЇДА, ПРЕДСТАВЛЕНОГО ДИСКРЕТНИМ КАРКАСОМ ТВІРНИХ

*Розроблено алгоритм наближеного визначення осі коноїда, представленого дискретним каркасом
спільних твірних.*

Ключові слова: вісь коноїда, дискретний каркас, твірна.

I. Ivanov, P. Petrov

AXIS APPROXIMATE DEFINITION OF CONOID DESCRIBED BY THE SET OF STRAIGHT LINES

*The algorithm of axis approximate definition of conoid described by the set of straight lines is made. The approximate
conoid axis is a line. Conoid is created by straight lines.*

Keywords: conoid axis, discretely carcass of straight lines.

Постановка проблеми. На коноїді, представленому дискретним каркасом.....

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наскільки відомо автору з.....

Постановка завдань. В роботі поставлено мету – розробити алгоритм....

Викладення основного матеріалу. Для наближеного визначення осі використовувалася така
властивість коноїдів: усі твірні поверхні перетинають її вісь [1].

формула (1)

Рисунок

Рис. 1. Назва рисунка

Назва таблиці

Табл. 1.

Висновки. В статті розроблено алгоритм наближеного....

Список використаних джерел:

ПБ, посада, науковий ступінь, вчене звання рецензентів статті.

Ціна договірна

Міжвузівський збірник наукових праць «Наукові нотатки» за галузями знань «Фізико-математичні науки» та «Технічні науки».

Комп'ютерний набір та верстка: О.Д. Клименко

Наклад 300 прим.

Веб-сайт збірника:

<http://eforum.lntu.edu.ua/index.php/naukovi-notatky>

Довідки за e-mail: naukovi-notatki@lutsk-ntu.com.ua

Рекомендовано до друку Вченою радою Луцького національного технічного університету, протокол № 2 від 23 вересня 2025 р.

Свідоцтво Державної реєстраційної служби України серія КВ, № 15901-4373ПР від 13.11.2019 р.

ISSN: 24-15-39-66

Відділ іміджу та промоції Луцького національного технічного університету
43018, м. Луцьк, вул. Львівська, 75

© Луцький національний технічний університет, 2025 р.