МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Луцький національний технічний університет

# ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

**DOI 10.36910/6775-2313-5352-2021-18**

Збірник наукових праць

Випуск 18
(травень, 2021)

Луцьк 2021

УДК 006, 537, 538, 546, 620, 621, 681

Рекомендовано до друку Вченою радою Луцького національного технічного університету, протокол № 11 від 27 травня 2021 р.

Свідоцтво Міністерства юстиції України про державну реєстрацію:
Серія КВ №18466-7266Р від 15.12.2011р.

ISSN: 2313-5352

Засновник Луцький національний технічний університет

Друкується в авторській редакції

«Перспективні технології та прилади» // м. Луцьк травень 2021р. – Луцьк: Луцький НТУ, 2021.-150 с.

В збірник включені статті, що відображають наукові та практичні результати сучасних розробок технології машино- та приладобудування, особливості експлуатації та повірки засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) та медичних приладів і систем. Представленні сучасні досягнення та перспективні напрямки розвитку технології виготовлення та складання машин і приладів в різних галузях народного господарства.

Адреса організаційного комітету:
Україна, 43018, м. Луцьк, вул. Львівська, 75, Луцький національний технічний університет, технологічний факультет, кафедра приладобудування.
Телефон: (0332) 26-49-43
Факс: (0332) 74-48-40
e-mail: confkptm@gmail.com

© Луцький національний технічний університет, 2021 р.

| | |
|---|---|
| ***ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР ВИДАННЯ*** | |
| **Марчук Віктор Іванович**, доктор технічних наук, професор, професор кафедри приладобудування, Луцький національний технічний університет, Україна. | |
| ***РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ*** | |
| 1. | **Савчук Петро Петрович,** доктор технічних наук, професор, професор, Луцький національний технічний університет, Україна. |
| 2. | **Ткачук Анатолій Анатолійович**, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроніки та телекомунікацій, Луцький національний технічний університет, Україна. |
| 3. | **Ларшин Василь Петрович**, доктор технічних наук, професор, професор кафедри технології машинобудування, Одеський національний політехнічний університет, Україна. |
| 4. | **Ляшук Олег Леонтійович**, доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри автомобілів, Тернопільський національний університет імені Івана Пулюя, Україна. |
| 5. | **Скоропад Пилип Ізидорович**, доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій, Національний університет «Львівська політехніка», Україна. |
| 6. | **Захаров Ігор Петрович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри метрології та технічної експертизи, Харківський** національний університет радіоелектроніки, Україна. |
| 7. | **Лебедєв Володимир Георгійович**, доктор технічних наук, професор, професор кафедри матеріалознавства та технології матеріалів, Одеський національний політехнічний університет, Україна. |
| 8. | **Заблоцький Валентин Юрійович**, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри електроніки та телекомунікацій, Луцький національний технічний університет, Україна. |
| 9. | **Антоній Свіць (Antoni Shwic),** доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформатизації та роботизації продукції, Люблінська політехніка, Польща. |
| 10. | **Богуш Вісніцкі (Bogusz Wisnicki),** PhD, доцент, факультет транспортної інженерії та економіки, Щецінська морська академія, Польща. |
| 11. | **Марцін Штепанек (Marcin Szczepanek),** PhD, доцент, факультет морської інженерії, Щецінська морська академія, Польща. |
| 12. | **Станіслав Іван (Stanislaw Iwan)**, доктор технічних наук, професор, факультет транспортної інженерії та економіки, Щецінська морська академія, Польща. |
| 13. | **Збігнев Матущак (Zbigniew Matuszak)**, доктор технічних наук, професор, факультет транспортної інженерії та економіки, Щецінська морська академія, Польща. |
| 14. | **Андрущак Ігор Євгенович**, доктор технічних наук, професор, декан факультету фінансів, обліку, лінгвістики та права, Луцький національний технічний університет, Україна. |
| 15. | **Антонюк Віктор Степанович**, доктор технічних наук, професор, професор кафедри виробництва приладів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені І. Сікорського», Україна. |
| 16. | **Гайдук Мікулас (Hajduk Mikuláš)**, доктор технічних наук, професор, професор кафедри робототехніки, Технічний університет Кошице, Словаччина. |
| 17. | **Гераймчук Михайло Дем'янович**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри приладобудування, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені І. Сікорського», Україна. |
| 18. | **Гулай Любомир Дмитрович**, доктор хімічних наук, професор, завідувач кафедри екології та охорони навколишнього середовища, Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки, Україна, |
| 19. | **Денисюк Віктор Юрійович**, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри приладобудування, Луцький національний технічний університет, Україна. |
| 20. | **Кайдик Олег Леонтійович**, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри приладобудування, Луцький національний технічний університет, Україна. |
| 21. | **Коломієць Леонід Володимирович**, доктор технічних наук, професор, ректор, Одеська державна академія технічного регулювання та якості, Україна. |
| 22. | **Куц Юрій Васильович**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційно-вимірювальних систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені І. Сікорського», Україна. |
| 23. | **Лапченко Юрій Сергійович**, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри приладобудування, Луцький національний технічний університет, Україна. |

| | |
|---|---|
| 24. | **Луньов Сергій Валентинович**, кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри фундаментальних наук, Луцький національний технічний університет, Україна. |
| 25. | **Луців Ігор Володимирович**, доктор технічних наук, професор, професор кафедри конструювання верстатів, інструментів та машин, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна. |
| 26. | **Марек Опеляк (Marek Opielak)**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри харчового машинобудування, Люблінська політехніка, Польща. |
| 27. | **Мірослав Пайор (Mirosław Pajor)**, доктор технічних наук, професор, декан факультету механічної інженерії та мехатроніки, Західнопоморський технічний університет, Польща. |
| 28. | **Пастернак Ярослав Михайлович**, доктор фізико-математичних наук, доцент, завідувач кафедри прикладної математики та механіки, Луцький національний технічний університет, Україна. |
| 29 | **Пермяков Олександр Анатолійович**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології машинобудування та металоріжучі верстати, Національний технічний університет України «Харківський політехнічний інститут», Україна. |
| 30. | **Пташенчук Віталій Віталійович**, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри приладобудування, Луцький національний технічний університет, Україна. |
| 31. | **Середюк Орест Євгенович**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри метрології та інформаційно-вимірювальної техніки, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Україна. |
| 32. | **Симонюк Володимир Павлович**, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри приладобудування, Луцький національний технічний університет, Україна. |
| 33. | **Тимчик Григорій Семенович**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри приладобудування, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені І. Сікорського», Україна. |
| 34. | **Ткачук Роман Андрійович**, доктор технічних наук, професор, професор кафедри біотехнічних систем, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна. |
| 35. | **Тонконогий Володимир Михайлович**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології машинобудування, Одеський національний політехнічний університет, Україна. |
| 36. | **Федосов Сергій Анатолійович**, доктор хімічних наук, професор, завідувач експериментальної фізики та інформаційно-вимірювальних технологій, Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки, Україна. |
| 37. | **Четвержук Тарас Іванович**, кандидат технічних наук, старший викладач кафедри прикладної механіки, Луцький національний технічний університет, Україна. |
| 38. | **Шваб'юк Василь Іванович**, доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри прикладної математики та механіки, Луцький національний технічний університет, Україна. |
| 39. | **Яворський Богдан Іванович**, доктор технічних наук, професор, професор кафедри радіотехнічних систем, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна. |
| 40. | **Ярошевич Микола Павлович**, доктор технічних наук, професор, професор кафедри галузевого машинобудування та лісового господарства, Луцький національний технічний університет, Україна. |
| 41. | **Марчук Ірина Вікторівна**, кандидат технічних наук, доцент кафедри приладобудування, Луцький національний технічний університет, Україна. |

# ЗМІСТ


| | |
|---|---|
| **А.В. Беспалова, А.І. Кныш, Д.І. Чекулаєв, В.П. Приступлюк, Т.В. Чумаченко**<br>**Пути снижения температуры алмазного отрезного круга при разрезании каменных строительных материалов** | 6 |
| **Біліщук В.Б., Боднар Р.Т.**<br>**Удосконалений метод обертової краплі** | 14 |
| **Витвицька Л. А., Дудій П. Ф., Скрипник Н. В., Витвицький З. Я.**<br>**Удосконалений метод та пристрій для комплексного дослідження уражень щитоподібної залози та ока людини** | 19 |
| **Галян В.В., Іващенко І.А, Кевшин А.Г., Шаварова Г.П.**<br>**Випромінювальна та безвипромінювальна релаксація іонів рідкісноземельних металів в матеріалах для оптоелектронної техніки (огляд)** | 24 |
| **Григор'єва, Н.С, Гуменюк Л.О, Марчук І.В., Собчук Д.С., Шабайкович В.А.**<br>**Вплив пандемії коронавірусу на виробництво та медичне обслуговування** | 32 |
| **Денисюк В.Ю., Симонюк В.П., Лапченко Ю.С., Кайдик О.Л., Пташенчук В.В.**<br>**Дослідження процесів обробки деталей при ударно-імпульсному навантаженні вібробункера** | 43 |
| **Диня В.І., Білик С.Г.**<br>**Обгрунтування виготовлення заготовок спеціальних зірочок трубчастих конвеєрів** | 51 |
| **Дубчак Н. А., Кирик О. М.**<br>**Обґрунтування раціональних конструктивно-кінематичних параметрів робочих органів адаптованих коренезбиральних машин** | 55 |
| **Захарчук В.І., Захарчук О.В., Галущак Д.О., Галущак О.О.**<br>**Метод вибору технології відновлення деталей** | 61 |
| **Клендій М.Б., Драган А.П.**<br>**Обгрунтування конструкції робочого органа гвинтової секції комбінованого грунтообробного знаряддя** | 66 |
| **Криницький О.С., Маковишин В.І., Біліщук В.Б.**<br>**Розробка пристрою для оцінки параметрів термоелектричних модулів** | 73 |
| **Ліннік А.Ю., Фльонц О.В.**<br>**Дослідження кінематико-динамічних звязків очисника з коренеплодом** | 81 |
| **Марчук В.І., Джугурян Т.Г., Марчук І.В., Карпюк В.О.**<br>**Про доцільність застосування шліфувальних кругів з переривчастим профілем на операціях безцетрового шліфування поверхонь обертання** | 90 |
| **В.І. Марчук, Ю.Й. Тулашвілі, Ю.А. Лук'янчук**<br>**Особливості підготовки фахівців інженерних спеціальностей за допомогою адитивних ІТ-технологій** | 95 |
| **Никируй Л.І., Замуруєва О.В., Федосов В.С., Урбан О.А., Захарчук Д.А., Федосов С.А.**<br>**Перспективні технології біопаливної енергетики** | 100 |
| **A. Perederko, PhD**<br>**The use of a wavelet transformation for removal of the noise component from the vibro signal** | 106 |
| **Пилипець М.І., Васильків В.В., Радик Д.Л., Пилипець О.М.**<br>**Передумови розроблення комбінованих операцій виготовлення гвинтових і шнекових заготовок методом обробки металів тиском** | 112 |
| **Prydalnyi B.I.**<br>**Mechatronic clamping mechanism with electro-hydraulic actuator for machine spindle units** | 124 |
| **Ткачук В. В., Середюк О. Є., Боднар Р. Т., Саманів Л. В.**<br>**Моделювання впливу компонентного складу та вологості природного газу на його теплофізичні характеристики** | 129 |

| | |
|---|---|
| **Чуйко М.М., Витвицька Л.А.**<br>**Експрес-метод контролю якості поверхнево-активних речовин для інтенсифікації нафтогазовидобутку** | 138 |
| **Шинкарук Х.М.,Чеховський С.А., Піндус Н.М., Романів В.М.**<br>**Теоретичне обгрунтування можливості застосування термокаталітичного методу для визначення теплоти згоряння природного газу** | 143 |

УДК 621.923.4:621.793.74
**А.В. Беспалова[1], А.И. Кныш[1], Д.И. Чекулаев[1], В.П. Приступлюк[1], Т.В. Чумаченко[2], В.Г. Лебедев**
*Одесская государственная академия строительства и архитектуры*
*Одесский национальный политехнический университет*

# ПУТИ СНИЖЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ АЛМАЗНОГО ОТРЕЗНОГО КРУГА ПРИ РАЗРЕЗАНИИ КАМЕННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

*В процессе ремонта и реставрации зданий часто разрезают керамические плитки и блоки из $Al_2O_3$ и $ZrO_2$. В настоящее время для этих целей широко используются алмазные абразивные диски. Процесс разрезания сопровождается значительным тепловыделением и нагревом алмазного диска. При температуре порядка 600° прочность диска на разрыв уменьшается в 2 раза и происходит графитизация алмазных зерен. Таким образом, при разрезании алмазным кругом каменных и строительных материалов, температура нагрева круга не должна превышать 600 ºС. В работе выполнено математическое моделирование процесса нагрева алмазного отрезного круга на металлической основе при разрезании керамических материалов для определения времени непрерывной работы до критической температуры 600ºС. Результаты моделирования, представленные на графиках, показали зависимость температуры нагрева круга от диаметра последнего, частоты вращения, минутной подачи, от зернистости и толщины круга. Показано, что путем подбора соответствующих характеристик процесса время непрерывной работы может быть порядка 10 – 12 мин без применения принудительного охлаждения.*

**Ключевые слова:** *отрезной диск, температура круга, критическая температура, суммарная силы резания, мощность резания, температура нагрева круга за 1 оборот, зернистость отрезного круга.*

**Постановка проблемы.** При проведении строительных, строительно-ремонтных и строительно-реставрационных работ возникает необходимость использования размерных элементов конструкций из каменных и керамических строительных материалов. Для получения элементов из таких материалов широко применяется разрезания каменных материалов пилами и отрезными абразивными кругами. Для удовлетворения этих условий разрезание осуществляется на камнерезных станках дисковыми алмазными кругами диаметром 250...350 мм, скорость вращения которых, а следовательно, и скорость резания составляет 35...80 м / с.

Ввиду высокой интенсивности процесса резания и интенсивного микростружкообразования, процесс разрезания сопровождается значительным тепловыделением.

Следует отметить, что диск алмазного круга, на который наносится алмазное абразивное покрытие изготавливается из обычной малолегированной стали типа Сталь 9ХФМ, (0,9% углерода и до 1% хрома, ванадия и молибдена). Эти стали обладают достаточно высокой прочностью на разрыв, чтобы противостоять большим центробежным силам, но невысокой теплостойкостью. Прочностные характеристики этих сталей при нагреве до температур 500 – 600 ºС уменьшаются практически в 2 раза, что может вызвать заклинивание или даже поломку и разрыв инструмента при работе.

Кроме того, графитизация алмазных режущих зерен, т.е. превращение тетрагонального углерода в гексагональный также происходит при температуре порядка 600 ºС. Следовательно работа при такой температуре круга может привести к потере алмазоносного слоя.

Таким образом, при разрезании алмазным кругом каменных и строительных материалов, температура нагрева круга не должна превышать 600 ºС. Следовательно время работоспособности алмазного отрезного круга — это время за которое он нагревается при непрерывной работе до температуры 600 ºС. Чем больше это время – тем выше работоспособность алмазного круга.

В настоящее время нет базы данных по назначению режимов разрезания кругами из СА, которые бы определяли закономерности нагрева и охлаждения алмазного отрезного круга во время работы.

Нет методики определения времени работы до критической температуры и не рассмотрены вопросы увеличения ресурса времени работы до критической температуры.

**© А.В. Беспалова, А.И. Кныш, Д.И. Чекулаев, В.П. Приступлюк, Т.В. Чумаченко, В.Г. Лебедев**

Алмазные круги выпускаются различных размеров и разной зернистости, поэтому экспериментальное исследование этого вопроса очень трудоемкое и длительное. Кроме того, нет надежной методики, которая позволяла бы осуществить эти измерения. В настоящей работе проведено математическое моделирование, которое дает возможность определить время безопасной работы до критической температуры. Кроме того, промоделированы некоторые способы повышения ресурса времени. Таким образом, можно создать базу предпочтительных режимов работы и экспериментально точечно уточнить математическую модель.

**Анализ литературных данных.**

Не смотря на большое количество литературы по разрезанию каменных и керамических материалов алмазными кругами практически нет сведений о параметрах процесса разрезания, которые позволяют управлять температурой круга во время работы. Это не дает возможности разрабатывать оптимальную технологию разрезания, определять время работы круга до критической температуры нагрева, а также не дает возможности разработать эффективную методику охлаждения круга.

Большое количество работ посвящено энергетике процесса разрезания, износу отрезных кругов и способам поддержания энергетических характеристик процесса в определенных параметрах.

В работе [1] автор подробно рассматривает процесс разрезания природных камней алмазным дисковым инструментом. Автор весьма квалифицированно определяет характеристики алмазных зерен, количество реально режущих зерен в пятне контакта круга с изделием. На этой базе автор определяет единичные и суммарные силы резания. Однако нет тепловых расчетов ни по отношению к обрабатываемой детали, ни по отношению нагрева алмазного круга на металлической основе. Следует также отметить, что все материалы относятся к 1979 году и естественно нуждаются в обновлении и пересмотре.

В работе [2] рассматриваются общие вопросы прогресса в абразивной обработке, однако нет данных о температуре нагрева алмазных кругов на металлической связке, как нет и данных по поводу алмазных отрезных дисков.

В работе [3] рассмотрены вопросы износа алмазного отрезного круга, в зависимости от содержания в алмазоносном слое карбидов бора. Вопросы нагрева круга при обработке не рассмотрены.

В работе [4] дается методика определения и повышения жесткости в узлах механизмов с алмазными пилами. Эти материалы также не могут быть использованы в настоящей работе.

В работе [5] исследуются вопросы – энергетического характера – зависимость сил резания и мощности резания от конкретных условий и режимов обработки. Однако вопрос энергетических затрат на нагрев круга не рассмотрен.

В работе [6] рассматривается износ алмазных секторов. Математическими методами авторы предсказывают износ круга в зависимости от количества удаляемой стружки. Тепловые эффекты в работе не рассмотрены.

В работе [7] рассмотрены энергетические характеристики процесса. Силы резания и мощность связываются с количеством удаляемой стружки, что может дать возможность обоснованно назначать режимы разрезания.

В работе [8] рассматривается влияние скорости периферии круга на износ. Эти исследования также дают возможность более обосновано назначать режим разрезания. Тепловые вопросы не рассмотрены.

В работе [9] рассматривается вопрос автоматического управления скоростью пилы и подачи на зуб, что дает возможность повысить эффективность процесса разрезания. Тепловые вопросы также не рассматриваются и, кроме того, результаты исследования процесса разрезания дисковой пилой не могут быть полностью перенесены на процесс разрезания диском.

В работе [10] зависимости удельной энергии разрезания и удельной энергии бурения. Тепловые вопросы не затрагиваются.

В работе [11] рассматриваются вопросы износа алмазной фрезы по измерениям силы резания. Несмотря на тщательность эксперимента, проведенного на современном оборудовании результаты, не могут быть приложены к теме настоящей работы.

Можно сделать вывод, что в настоящее время в литературе нет данных о нагреве алмазного круга на металлической основе во время работы.

**© А.В. Беспалова, А.И. Кныш, Д.И. Чекулаев, В.П. Приступлюк, Т.В. Чумаченко, В.Г. Лебедев**

**Постановка задачи.** В данной работе провести математическое моделирование, которое дает возможность определить время безопасной работы до критической температуры, промоделировать некоторые способы повышения ресурса времени. Таким образом, можно создать базу желаемых режимов работы и экспериментально точечно уточнить математическую модель.

**Экспериментальные и аналитические исследования.**

В исследованиях для определения единичных сил резания применялась несколько изменена методика, изложенная в работе [12]. Использовалась величина глубины вдавливания алмазной пирамидки, что дало возможность связать составляющую $P_y$ с величиной углубления зерна в металл [13]:

$$P_z = 7{,}15 \cdot H_V \cdot h^2, \quad (1)$$

где: *Hv* твердость разрезаемого материала по шкале Виккерса, *h* – средняя величина углубления зерна в материал. Произведение $Pz \cdot V_{кр}$ (скорость круга) дает значение тепловой мощности резания отдельным зерном. Для определения последней величины использовалась методика описанная в работе [14]. Использование этой методики дает возможность по тепловому импульсу от микротермопары определить количество реально режущих зерен в дуге контакта круга с изделием, расстояние между режущими зернами, удельное количество режущих зерен и измеряя реальный съем материала на каждом проходе и деля величину этого съема на количество зерен, можно определить среднюю величину углубления зерна в шлифуемый или разрезаемый материал.

Если остановиться на примере разрезания пирога с $ZrO_2$ вертикальной подачей, как показано на рис.1, то можно ввести следующие обозначения [15, 16]:

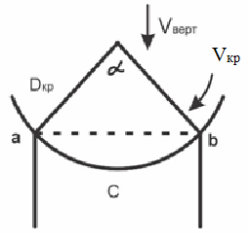



Рис.1. Схема разрезания образца из керамики $ZrO_2$ алмазным разрезным кругом на металлической основе.

$$L_{конт} = 2 \arcsin \frac{C}{D} \cdot R \quad (2)$$

Для ориентировочного расчета определим площадь контакта режущей кромки круга с изделием. Она, очевидно, будет равна $F_{конт} = L_{конт} \cdot S$ и при проекции на плоскость будет представлять из себя вытянутый прямоугольник. Если взять промежуток времени от точки *a* до точки *b*, то время теплового воздействия от точки *a* до точки *b* может рассматриваться как некоторый короткий промежуток времени равный $\tau = L_{конт}/Vк$. Таким образом, сведем задачу к мгновенному плоскому источнику. Погрешности, возникающие от использования этой модели, могут быть определены в будущем при экспериментальных измерениях.

Атмосфера, в которой работает отрезной круг состоит из пограничного слоя воздуха, который существует около круга независимо от его структуры и пористости. [16]. Это в свою очередь означает, что воздух при разрезании интенсивно обдувает круг и можно ожидать существенного снижения температуры, тем более, что сброс тепла в пределах одного оборота круга осуществляется с большей части его поверхности. Для определения количества тепла уносимого с поверхности круга определим коэффициент теплоотдачи для данных условий.

Для оценки этого количества необходимо найти коэффициент конвективного теплообмена между движущейся средой и обдуваемой поверхностью (стенкой).

Количество теплоты, переданное в процессе теплоотдачи, определяется по уравнению Ньютона-Рихмана:

$$Q = \alpha(t_{ст} - t_{ж})F, \quad (3)$$

где $\alpha$ - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м$^2$·К); $t_{ж}$, $t_{ст}$ – средние температуры жидкости и стенки, °С; F – поверхность стенки, м$^2$; $Q$ – тепловой поток (количество теплоты), Вт (Дж); $\tau$ – время, с.

© А.В. Беспалова, А.И. Кныш, Д.И. Чекулаев, В.П. Приступлюк, Т.В. Чумаченко, В.Г. Лебедев

Коэффициент теплоотдачи $\alpha$ – характеризует интенсивность теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой. Коэффициент α показывает, какое количество тепла передается от единицы поверхности стенки к жидкости в единицу времени при разности температур между стенкой и жидкостью в 1 градус (К),

$$[\alpha]=\left[\frac{Q}{F(t_{ст}-t_{ж})}\right]=\left[\frac{Дж}{м^2\times с\times К}\right]=\left[\frac{Вт}{м^2\times К}\right] \quad (4)$$

Определение α является основной задачей расчета теплообменных аппаратов. Обычно коэффициент теплоотдачи определяют из критериальных уравнений, полученных преобразованием дифференциальных уравнений гидродинамики и конвективного теплообмена методами теории подобия. Проще всего коэффициент теплообмена определить через критерий Нуссельта по выражениям:

$$\alpha=\frac{Nu\times\lambda}{\ell} \quad (5)$$

и

$$Nu=0.008\times Re^{0,9}\times Pr^{0,43}, \quad (6)$$

где

$$Re=\frac{\omega\ell}{\nu}=\frac{\varpi\ell\rho}{\mu}, \quad (7)$$

критерий Рейнольдса, который характеризует гидродинамический режим потока при вынужденном движении и является мерой соотношения сил инерции и вязкого трения;

$$Pr=\frac{\nu}{a}=\frac{c\mu}{\lambda}- \quad (8)$$

критерий Прандтля, который характеризует физико-химические свойства теплоносителя и является мерой подобия температурных и скоростных полей в потоке; $l$ – определяющий размер, м; $\rho$ – плотность теплоносителя, кг/м$^3$; $\Delta t=t_{ст}-t_{ж}$ – температурный напор между стенкой и теплоносителем, $^0$С; $\lambda$ – коэффициент теплопроводности теплоносителя, Вт/(м·К); μ – динамический коэффициент вязкости, Па·с; с – теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг·К); τ – время процесса, с, ω – скорость движения теплоносителя м/с.

Расчет критерия *Nu* для скорости воздушного потока 30 – 50 м/с и для нормальной температуры воздуха в цехе 20 $^0$С=293 °К, по приведенным формулам, составляет 51,34. Соответственно коэффициент теплообмена α будет, согласно (3), α= 445 Вт/м$^2$ °К.

Для того, чтобы определить количество теплоты уносимой с поверхности пятна контакта круга с деталью необходимо перемножить длину дуги контакта круга с изделием и величину поперечной подачи.

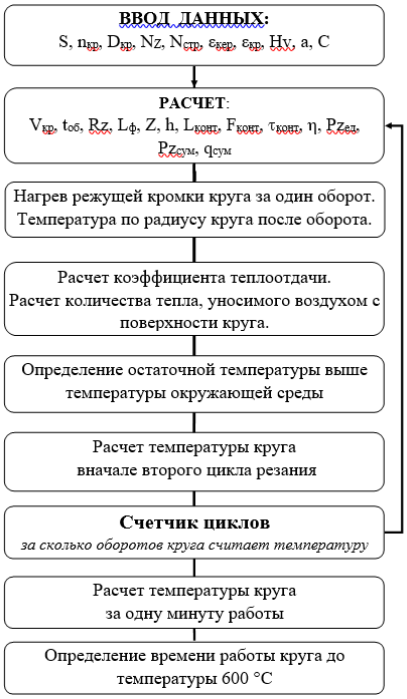
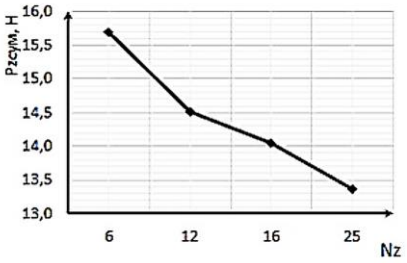


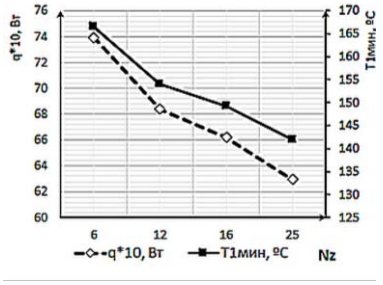

Рис.2. Блок схема программы расчетов

© А.В. Беспалова, А.И. Кныш, Д.И. Чекулаев, В.П. Приступлюк, Т.В. Чумаченко, В.Г. Лебедев

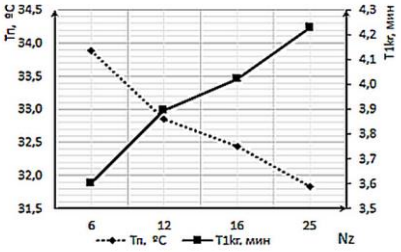
Блок-схема программы расчетов показана на рис.2. Расчеты проводились при изменении параметров в следующих пределах: (см. программу MathCad). На рис. 2 S- ширина круга, $D_{кр}$ - диаметр круга, $V_{кр}$ -скорость круга, $V_{верт}$-скорость вертикальной подачи, n-частота вращения. Хорда сектора части круга, находящейся в данный момент в пределах образца, ab=C. α – угол сектора, L-длина дуги контакта равная. Результаты расчетов показаны на рис. 3 – 7.




а) Изменение суммарной силы резания



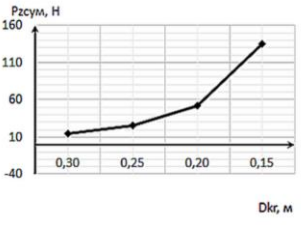

б) Изменение мощности и температуры нагрева круга за 1 мин

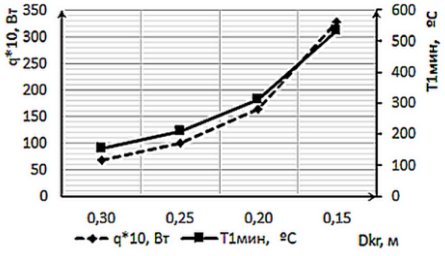


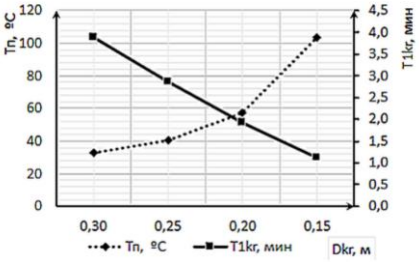

в) Изменение температуры нагрева круга за 1 оборот и предельного времени работы до критической температуры

Рис. 3. Зависимость параметров разрезания от изменения зернистости круга

Результаты моделирования показали, величина зернистости отрезного круга значительно влияет на важные параметры работы. Суммарная сила резания снижается несмотря на то, что единичная сила резания возрастает. Это объясняется тем, что при увеличении зернистости резко уменьшается количество одновременно работающих зерен. Поэтому если нет особых требований по шероховатости поверхности, выгоднее работать более крупнозернистым кругом, несмотря на его более высокую стоимость. Согласно изменению суммарной силы резания, законы изменения мощности резания и температуры нагрева круга за 1 минуту работы, подчиняются той же закономерности. Температура круга за один оборот медленно снижается, зато совершенно естественно увеличивается время работы до критической температуры.



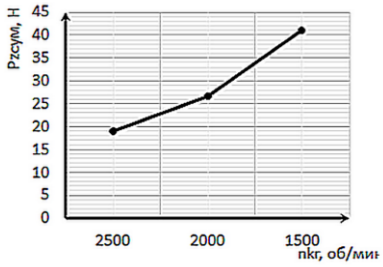



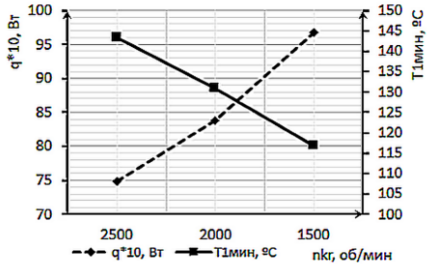



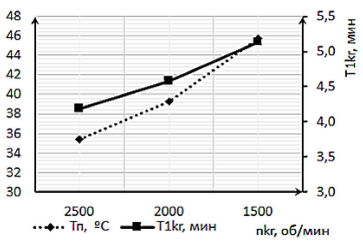

а) б) в)

Рис. 4. Зависимость параметров разрезания от изменения диаметра отрезного круга

Суммарная сила резания, мощность и нагрев круга за 1 мин. возрастают. Температура нагрева круга за 1 оборот возрастает. Время работы до критической температуры значительно снижается.



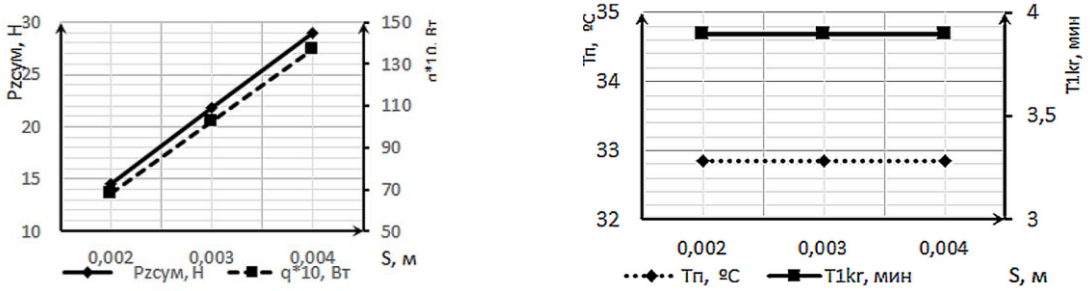

а) б) в)

Рис. 5. Зависимость параметров разрезания от изменения частоты вращения отрезного круга

Уменьшение частоты вращения вызывает увеличение суммарной силы резания,

© А.В. Беспалова, А.И. Кныш, Д.И. Чекулаев, В.П. Приступлюк, Т.В. Чумаченко, В.Г. Лебедев

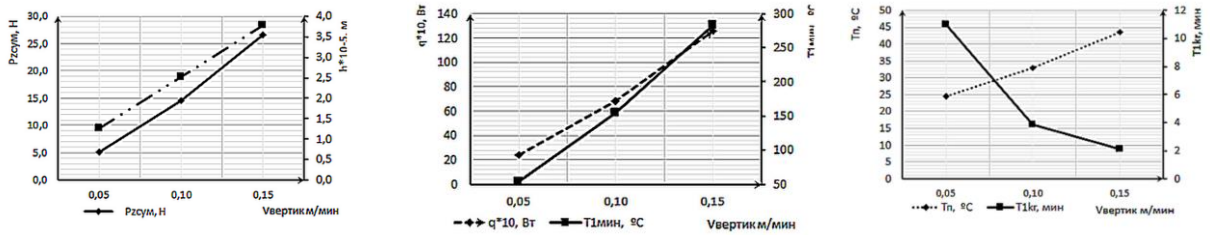
мощности резания, температуры нагрева круга за 1 оборот. Время работы до критической температуры значительно увеличивается.




а) б)

Рис. 6. Зависимость параметров разрезания от изменения частоты вращения отрезного

При увеличении толщины отрезного круга, как и ожидалось, возрастает суммарная сила Pz и мощность резания. Все остальные параметры остаются без изменения. Причина этого в том, что остается неизменной интенсивность теплового потока.




а) Зависимость параметров разрезания от изменения толщины отрезного круга

б) Мощность и температура нагрева круга за 1 мин

в) Температура нагрева круга за 1 оборот и предельное время работы до критической температуры

Рис. 7. Зависимость параметров разрезания от изменения величины вертикальной подачи отрезного круга

При увеличении вертикальной подачи возрастает суммарная сила резания. Нагрузка на режущее зерно увеличивается за счет увеличения средней величины внедрения зерна в материал. Мощность резания и температура нагрева круга за 1 минуту возрастает. Также возрастает нагрев круга за 1 оборот. Время работы до критической температуры значительно уменьшается.

**Выводы**

Математическое моделирование показало, что металлический диск – основа алмазного круга, во время работы существенно нагревается.

Практически все элементы режимов разрезания влияют на температуру круга, хотя и в разной мере. Наибольшее влияние оказывает величина вертикальной подачи.

Частота вращения круга и изменение его диаметра влияют практически одинаково, поскольку скорость резания зависит как от частоты вращения, так и от диаметра круга.

Изменение зернистости отрезного круга значительно влияет на его нагрев. Зависимость здесь достаточно сложная, поскольку увеличение размера зерна увеличивает единичную силу резания и тепловую мощность от каждого отдельного зерна. Однако при этом уменьшается количество зерен одновременно участвующих в работе. В нашем случае в теплообразовании принимает участие меньшее количество более мощных тепловых источников. Однако увеличение мощности каждого единичного источника не может компенсировать уменьшение их количества. Это явление необходимо проверить на других кругах, например на керамической связке.

По результатам моделирования можно сказать, что для обеспечения максимальной тепловой стойкости круга следует выбирать круги зернистости не менее 25 и работать при скорости вертикальной подачи не более 0,05 м/мин.

**© А.В. Беспалова, А.И. Кныш, Д.И. Чекулаев, В.П. Приступлюк, Т.В. Чумаченко, В.Г. Лебедев**

**Литература**

1. Азаров, В.Н. О концентрации и дисперсном составе пыли в воздухе рабочих и обслуживаемых зон предприятий стройиндустрии. Качество внутреннего воздуха и окружающей среды: материалы междунар. конф. Волгоград, 2003. С. 1-7..

2. Dongming Guo. Advances in abrasive technology IX. Trans Tech Publication. Ueticon-Zuerich, 2006.

3. Islak S. Kastamonu, Çelik H. Effect of sintering temperature and boron carbide content on the wear behavior of hot pressed diamond cutting segments. Science of Sintering. 2015. Vol. 47(2). P.131-143.

4. Selvi E, Topaloglu F, Tazegul O. Conventional sintering of diamond cutting tool used in natural stone cutting. AIP Conference Proceedings. 2013. https://doi.org/10.1063/1.4849309 (дата звернення 20.05.2015).

5. Turchetta S. Cutting force in stone machining by diamond disk. Advances in Materials Science tnd Engineering. 2010.

6. Qin Sun, Jinsheng Zhang, Jibo Hu. Fahp and topsis prediction of diamond segments wear when using frame saw to cut granites. Mathematical Problems in Engineering. China, 2017.

7. Turchetta S.. Polini W., Buyuksagis I. S. Investigation on Stone Machining Performance Using Force and Specific Energy Advances in Mechanical Engineering. 2009.

8. Siniša Dunda. Influence of the circular saw disc peripheral velocity on diamond tool consumption during dimension stone cutting. Rudarsko-geološko-naftni zbornik. Croatia, Zagreb, 1989. Vol. 44, No. 1. P. 135-142.

9. Ugur Simsir. Torque-controlled adaptive speed control on a CNC marble saw machine. Advances in Mechanical Engineering. 2014. Vol. 228. No. 2. P. 230-245.

10. Davor Antoljak, Trpimir Kujundžić, Tomislav Korman, Dalibor Kuhinek. Dependency of specific energy of rock cutting on specific drilling energy. Rudarsko-geološko-naftni Zbornik. 2018. Vol. 33(3). P. 23-32.

11. Polini W., Turchetta S. Monitoring of diamond mill wear in time domain during stone cutting using cutting force measurements. Advances in Mechanical Engineering. 2009. P. 1-5.

12. Редько С.Г. Процессы теплообразования при шлифовании металлов. Саратов:, 1986. 231 с.

13. Tuncer Cebeci, Douglas E. Abbott. Boundary layers on a rotating disk. AIAA Journal. 1975 Vol. 1(6). P. 561-567.

14. Клименко Н.Н., Лебедев В.Г. и др. Методика измерения температур шлифования термопарами при обработке наплавленных поверхностей машиностроительных деталей. Материалы 20-й междунар. научно-практ. конф. г. Харьков, 23-24 декабря 2015г. Харьков, 2015. С 34-38.

15. Лебедев В.Г., Чумаченко Т.В., Луговская Е.А., Беспалова А.В. Фазовые превращения в поверхностном слое шлифуемой детали Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении: матеріали міжнар. наук.-техн. конф. г.Одеса, 26-29 сентября 2018 г. Одесса, 2018. С. 96-98.

16. Bespalova A., Lebedev V., Frolenkova O., Chumachenko T. Cutting stone and ceramic building materials with diamond discs. Scientific letters of academic society of Michal Baludansky. 2019. Vol. 7.No 2. P. 9-17.

**А.В. Беспалова, А.І. Кныш, Д.І. Чекулаєв, В.П. Приступлюк, Т.В. Чумаченко**
Одеська державна академія будівництва та архітектури
Одеський національний політехнічний університет

## ШЛЯХИ ЗНИЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ АЛМАЗНИХ ВІДРІЗНИХ КРУГІВ ПРИ РОЗРІЗАННІ КАМ'ЯНИХ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

*У процесі ремонту і реставрації будівель часто розрізають керамічні плитки і блоки з $Al_2O_3$ і $ZrO_2$. В даний час для цих цілей широко використовуються алмазні абразивні диски. Процес розрізання супроводжується значним виділенням тепла і нагріванням алмазного диска. При температурі близько 600° міцність диска на розрив зменшується в 2 рази і відбувається графітизація алмазних зерен. Таким чином, при розрізанні алмазним кругом кам'яних і будівельних матеріалів, температура нагріву кола не повинна перевищувати 600 °С. В роботі*

**© А.В. Беспалова, А.И. Кныш, Д.И. Чекулаев, В.П. Приступлюк, Т.В. Чумаченко, В.Г. Лебедев**

*виконано математичне моделювання процесу нагрівання алмазного відрізного круга на металевій основі при розрізанні керамічних матеріалів для визначення часу безперервної роботи до критичної температури 600ºС. Результати моделювання, представлені на графіках, показали залежність температури нагрівання кола від діаметра останнього, частоти обертання, хвилинної подачі, від зернистості і товщини кола. Показано, що шляхом підбору відповідних характеристик процесу час безперервної роботи може бути близько 10 - 12 хв без застосування примусового охолодження.*

**Ключові слова**: алмазний відрізний диск, температура круга, критична температура, сумарна сили різання, потужність різання, температура нагріву круга за 1 оборот, зернистість відрізного круга.

A. Bespalova, D. Chekulaev1, V. Pristupljuk, T. Chumachenko
Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture
Odessa National Polytechnic University

## WAYS OF REDUCING THE TEMPERATURE OF THE DIAMOND CUTTING WHEEL WHEN CUTING STONE BUILDING MATERIALS

During the repair and restoration of buildings, ceramic tiles and blocks of $Al_2O_3$ and $ZrO_2$ are often cut. At present diamond abrasive disks are widely used for these purposes. The cutting process is accompanied by considerable heat release and heating of the diamond disk. At a temperature of about 600º, the tensile strength of a disc is reduced by a factor of 2 and graphitization of diamond grains occurs. Thus, when cutting stone and building materials with a diamond circle, the disk heating temperature should not exceed 600 ° C. In the work, mathematical modeling of the heating of a diamond cutting disk on a metal base was performed while cutting ceramic materials to determine the time of continuous operation to a critical temperature of 600 ° C. The simulation results presented in the graphs showed the dependence of the heating temperature of the disk on the diameter of the latter, the speed of rotation, the minute feed, the grain size and the thickness of the disk . It is shown that by selecting appropriate process characteristics the time of continuous operation can be of the order of 10 - 12 min without the use of forced cooling.

**Key words:** cutting disc, wheel temperature, critical temperature, total cutting forces, cutting power, wheel heating temperature for 1 revolution, cutting wheel grain size.

**© А.В. Беспалова, А.И. Кныш, Д.И. Чекулаев, В.П. Приступлюк, Т.В. Чумаченко, В.Г. Лебедев**

532.61
**Біліщук В.Б., Боднар Р.Т.**
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

## УДОСКОНАЛЕНИЙ МЕТОД ОБЕРТОВОЇ КРАПЛІ

*В статті вказано особливості застосування водних розчинів поверхнево-активних речовин в газо- нафтовидобутку. Вказано визначальні параметри таких розчинів, які досліджують при виборі застосовуваних поверхнево-активних речовин. Здійснений аналіз відомих методик визначення міжфазного натягу методом обертової краплі показав можливість вдосконалення процедури розрахунку міжфазного натягу для її спрощення. В статті запропоновано вдосконалити методику розрахунку міжфазного натягу методом фіксованої обертової краплі із застосуванням рівняння Воннегута з коригуючим коефіцієнтом. Значення коригуючого коефіцієнта було отримано із розрахунків контурів фіксованих обертових крапель, а також розрахунку міжфазного натягу із застосуванням формули Воннегута на основі розрахованих контурів. Встановлено, що коригуючий коефіцієнт можна представити як функціональну залежність від відношення діаметра до довжини обертової краплі. Для перевірки такого зв'язку здійснювали розрахунок коефіцієнтів кореляції між коригуючим коефіцієнтом та розмірами обертової краплі. В ході експериментальної перевірки було підтверджено можливість використання розробленої методики для дослідження параметрів водних розчинів поверхнево-активних речовин з нафтопродуктами.*

**Ключеві слова:** *Рівняння Воннегута, міжфазний натяг, поверхнево-активна речовина, нафтопродукти.*

**Постановка проблеми.**

Сфера використання поверхнево-активних (ПАР) речовин на даний час є досить широкою. Більшість галузей народного господарства країни використовують в своїх технологічних процесах ПАР або їх композиції. Зокрема, з метою збільшення об'ємів нафтогазовидобутку в Україні широко використовують водяні розчини ПАР, за допомогою яких здійснюється обробка привибійних зон пластів експлуатаційних і нагнітальних свердловин, а також підтримування пластових тисків на нафтових родовищах. До визначальних параметрів розчинів ПАР слід віднести такі: поверхневий натяг (на межі контакту рідкої і газоподібної фаз), міжфазний натяг (МН) (на межі контакту двох нерозчинних одна в одній рідких фаз) і крайовий кут змочування (на межі контакту трьох фаз). Тому актуальним є застосування методик і вимірювальних приладів для оцінки показників розчинів ПАР у конкретних технологічних операціях [1] при виборі типів ПАР.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Першим, хто запропонував використовувати метод обертової краплі для визначення МН був Б. Воннегут [2]. Суть методу полягає в наступному. Всередині рідини β (рис. 1), що знаходиться в герметичній трубці, присутня крапля легшої рідини α. Трубка з рідинами обертається навколо горизонтальної осі. За рахунок відцентрових сил важча рідина витісняється до периферії, а крапля легшої рідини – до осі обертання. Крапля легшої рідини приймає видовжену форму вздовж осі обертання. Даний процес проходить проти сил МН, які намагаються зробити краплю з меншою площею поверхні. В запропонованому методі МН визначають із такої залежності:

$$\sigma = \frac{\Delta\rho\omega^2 D^3}{32}, \qquad (1)$$

де $\Delta\rho$ − різниця густин рідин; $\omega$ − швидкість обертання; $D$ − діаметр краплі.

Наступні роботи Прінсена, Дж. Слаттері, С. Чена, Р. Кісіля [3–5] були присвячені вдосконаленню методики розрахунку МН на основі вимірювання різних геометричних розмірів краплі, що зменшило похибку вимірювання МН.

В роботі [6] запропоновано методику, в якій крапля витискається через отвір в корку під час обертання і одним кінцем фіксується на вертикальній стінці (рис. 2). При цьому рідини обертаються з однаковою швидкістю і є можливість дослідження динамічного (змінного в часі) МН. Розрахунок МН ґрунтується на складній ітераційній процедурі розрахунку контуру обертової краплі на основі диференційних рівнянь.

**© Біліщук В. Б., Боднар Р. Т.**

$$\frac{d\varphi}{dl_c} = K_c - \frac{x_c^2}{2} - \frac{\sin\varphi}{x_c},\ \frac{dx_c}{dl_c} = \cos\varphi,\ \frac{dz_c}{dl_c} = \sin\varphi, \qquad (2)$$

де $x_c=x/c$, $z_c=z/c$ – безрозмірні координати точок контуру обертової краплі; $x$, $z$ – розмірні координати точок контуру обертової краплі; $c=(\sigma/(\Delta\rho\cdot\omega^2))^{1/3}$ – обертова стала; $\Delta\rho$ – різниця густин рідин; $\omega$ – кутова швидкість обертання; $\sigma$ – міжфазний натяг на межі розділу двох рідин; $\varphi$ – кут між віссю обертання трубки та нормаллю, проведеною до контуру обертової краплі в точці з координатами $x_c$, $z_c$; $K_c=K\cdot c$, $K_c$, $K$ – безрозмірна і розмірна кривизна поверхні обертової краплі у її вершині; $l_c=l/c$, $l_c$, $l$ – безрозмірна і розмірна довжина дуги меридіана профілю обертової краплі від її вершини.

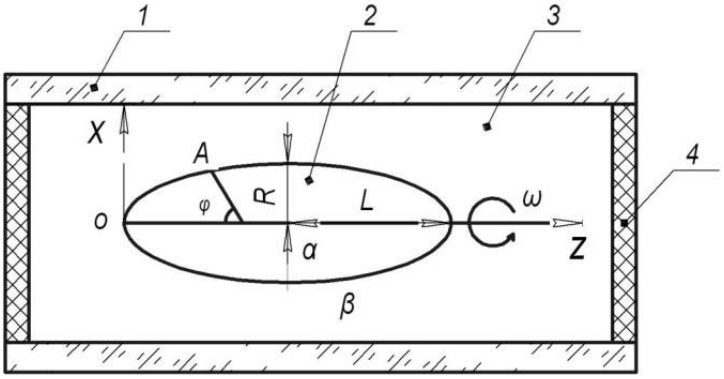



Рис. 1. Профіль краплі при обертанні навколо горизонтальної осі z
1 – скляна трубка; 2 − крапля легшої рідини; 3 – важча рідин; 4– корок

Розв'язок таких рівнянь можливий тільки числовими методами, наприклад Рунге-Кутта, потребує використання обчислювальної техніки, що є недоліком запропонованої методики в роботі [6].

**Постановка завдання.**

Метою даної роботи є розроблення методики визначення МН рідин, яка дозволить застосовувати рівняння (1) для фіксованої обертової краплі.

**Виклад матеріалів дослідження.**

Застосування рівняння (1) для розрахунку значення МН дозволить спростити процедуру визначення МН, так як відпаде необхідність здійснювати громіздкі багато разів повторювані ітераційні розрахунки координат точок контуру обертової краплі. В ході експериментальних досліджень було виявлено, що при наявності на контурі фіксованої обертової краплі частини, що має видовжену циліндричну форму формула (1) дає такий самий результат як і застосована ітераційна процедура. В інших випадках застосування рівняння (1) неможливе. Пропонується у вираз (1) добавити коефіцієнт $F$, який буде коригувати розраховане значення, так щоб воно відповідало дійсному. Цей коефіцієнт $F$ може бути представлений як функція параметрів краплі, які враховують в рівняннях (2), діаметра $D$ в певному січені і довжини $L_{max}$ краплі: $F(x,z,l,K,D,L_{max})$. Рівняння (1) набуде вигляду

$$\sigma = \frac{\Delta\rho\omega^2 D^3}{32}\cdot F\left(x,z,l,K,D,L_{\max}\right). \qquad (3)$$

Розглянемо вибір параметрів, який може бути використаний для розрахунку коефіцієнта $F$. Коефіцієнт $F$ можна визначати як залежність від різних параметрів краплі або їх поєднання. Очевидно зручно використовувати параметри, які легко визначаються в експерименті. Такими параметрами є діаметр $D$ і довжина краплі $L_{max}$. Як було написано вище діаметр краплі може визначатись в будь-якому її січенні, найзручніше було б визначати діаметр посередині профілю краплі (рис. 2).

Перевірку взаємозв'язку між $F$ і $D$, $L_{max}$ здійснювали шляхом розрахунку коефіцієнта кореляції між ними. Для цього згідно виразів (2) розраховували розмірні контури обертової краплі з заданим МН $\sigma$. Для кожного контуру розраховували МН $\sigma_B$ згідно (1) і коефіцієнт $F$:

$$F = \frac{\sigma}{\sigma_B}. \qquad (4)$$

© Біліщук В. Б., Боднар Р. Т.

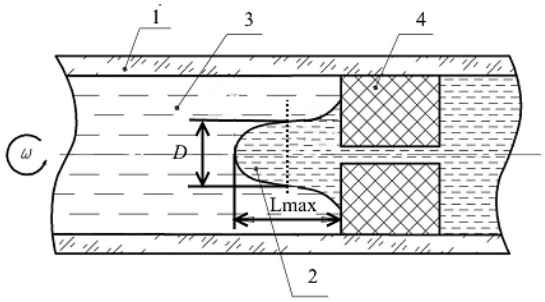



Рис. 2. Контур фіксованої обертової краплі
1 – скляна трубка; 2 − крапля легшої рідини; 3 – важча рідина; 4– корок з отвором

На основі розрахованих координат точок контурів обертових крапель визначали $L_{max}$, $D$ і коефіцієнти кореляції $C$ між $F$ і $L_{max}$: $C_{F,Lmax}$=–0,577, а також $F$ і $D$: $C_{F,D}$=–0,157. Отже застосування тільки одного параметра не дає можливості однозначного встановлення залежності між $F$ і розмірами краплі. В той же час було виявлено, що при застосуванні відношення $D/L_{max}$ існує корелійний зв'язок з $F$: $C_{F,D/Lmax}$=0,962. Отже $F$ може бути представлений як функція від $D/L_{max.}$

Для знаходження залежності $F(D/L_{max})$ було розраховано їх значення для різних контурів (табл. 1). Як видно із таблиці для крапель з $D/L_{max}$<0,2 (тобто довжина краплі має бути в 5 раз більшою за діаметр в середній частині) можливо використовувати формулу Воннегута (1), відносна методична похибка при цьому не перевищуватиме 0,2 %.

Таблиця 1.

Розраховані значення $F$ і $D/L_{max}$

| $F$ | $D/L_{max}$ | $F$ | $D/L_{max}$ | $F$ | $D/L_{max}$ | $F$ | $D/L_{max}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1,001039 | 0,22196 | 1,002179 | 0,418705 | 1,035984 | 0,789224 | 1,415196 | 1,822904 |
| 1,001007 | 0,236717 | 1,010066 | 0,594264 | 1,074951 | 0,978523 | 1,570379 | 2,12858 |
| 1,00121 | 0,324853 | 1,035984 | 0,78922 | 1,169168 | 1,271022 | 1,757722 | 2,474972 |
| 1,002179 | 0,418704 | 1,035984 | 0,789223 | 1,281753 | 1,542066 | 1,757728 | 2,474969 |

Апроксимувавши дані в табл. 1 поліномами різного порядку, одержимо значення коефіцієнтів апроксимуючих поліномів і середнє геометричне суми квадратів різниць між даними табл. 1 і результатами апроксимації (табл. 2). Як видно із отриманих даних для апроксимації недоцільно використовувати поліноми вище 6-го порядку і нижче 3-го порядку.

Таблиця 2.

Результати апроксимації залежності $F(D/L_{max})$

| Коефіцієнт | Степінь полінома | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| $a_0$ | 0,82858 | 0,99518 | 1,0405 | 1,0262 | 0,99928 | 0,99841 |
| $a_1$ | 0,34124 | -0,048294 | -0,22504 | -0,14566 | 0,039636 | 0,047135 |
| $a_2$ | | 0,14597 | 0,31137 | 0,18604 | -0,22496 | -0,24761 |
| $a_3$ | | | -0,041732 | 0,030536 | 0,41807 | 0,44965 |
| $a_4$ | | | | -0,013620 | -0,17501 | -0,19695 |
| $a_5$ | | | | | 0,024412 | 0,031778 |
| $a_6$ | | | | | | -0,00095047 |
| Середнє геометричне суми квадратів різниць | 0,0697 | 0,0120 | 0,00276 | 0,00198 | 0,000423 | 0,000421 |

© Біліщук В. Б., Боднар Р. Т.

Із врахування апроксимаційної залежності формулу (3) можна переписати у вигляді:

$$\sigma = \frac{\Delta\rho\omega^2 D^3}{32} \cdot \sum_i a_i \left( \frac{D}{L_{\max}} \right)^i \qquad (5)$$

**Обговорення результатів.**

Для експериментальної перевірки використовували 1% водний розчин ПАР стінолу і гас. В ході експерименту МН визначали методом Воннегута і розглянутим у статті. При використанні розробленого методу спеціально знижували частоту обертання трубки з рідинами так, щоб на краплі не утворювалась циліндрична частина. Частота обертів не перевищувала 2000 об/хв. Результати вимірювань МН продемонстровані в таблиці 2. Результати демонструють хорошу повторюваність значень МН, що підтверджує ефективність розробленого методу.

Слід обговорити деякі обмеження і застереження щодо застосування розробленої методики. В ході експерименту забезпечувалась умова повного змочування краплею рідини (гасом) стінки корку (фторопласт) при третій фазі – воді (чи водному розчину ПАР). Розрахунки із розв'язуванням рівнянь (2) також проводились для умов повного змочування. Таким чином в ході експериментальних досліджень був усунений один із параметрів, що впливає на результат – кут змочування. При дослідженні нафтопродуктів такі випадки переважають – в конструкції приладу використовують корки з фторопласту, які добре змочуються нафтопродуктами і гірше водними розчинами ПАР. При використанні інших матеріалів або досліджуваних рідин може не забезпечуватись умова повного змочування. В такому випадку необхідно розрахунки здійснювати із врахуванням кута змочування (який попередньо визначають).

Таблиця 2.

Результати визначення міжфазного натягу 1% водного розчину стінолу з гасом

| Номер досліду | Міжфазний натяг, мН/м | |
|---|---|---|
| | Метод Воннегута | Запропонований метод |
| 1 | 0,2 | 0,198 |
| 2 | 0,214 | 0,203 |
| 3 | 0,217 | 0,228 |

**Висновки.**

Запропонований метод не вимагає проведення великої кількості обрахунків теоретичних контурів фіксованих обертових крапель, що значно спрощує і полегшує проведення експериментів. При цьому зберігаються переваги методу описаного в [6] – утворення краплі під час обертання рідин в гіростатичній рівновазі дозволяє визначати МН рідин з невеликою затримкою в часі (не більше 0,3 с), що можна використовувати для дослідження динамічного МН. Відсутність необхідності використання високих частот обертання трубки з рідинами спрощує процедуру проведення вимірювань і конструкцію приладу.

**Література**

1. Михайлюк В., Рудий М., Використання поверхнево-активних речовин в процесах нафтовидобутку на родовищах ВАТ"Укрнафта". – ПП „Галицька друкарня ПЛЮС”, 2009, 399 с.

2. Vonnegut B. Rotating Bubble Method for the Determination of Surface and Interface Tensions // Rev. Sci. Instr. – 1942.– V13, No1. – P. 6–9.

3. Princen H. M. Measurement Of Interfacial Tension From The Shape Of A Rotating Drop / H. M. Princen, I. Y. Z. Zia, S. G. Mason // J. Colloid Interface Sci. – 1967. - No 23. - P. 99-107.

© **Біліщук В. Б., Боднар Р. Т.**

4. Slattery J. C. Alternative solution for spinning drop interfacial tensio-meter / J. C. Slattery, J. D. Chen // J. Colloid Interface Sci. – 1978 – V64, No2 – P. 371–373.

5. Кісіль Р. І., Чеховський С. А. Удосконалена методика і прилад для вимірювання міжфазного натягу методом обертової краплі. Методи та прилади контролю якості. – 1999. – No4. – С. 36–39.

6. Біліщук В. Б. Метрологічні дослідження вимірювання міжфазного натягу рідин методом обертової краплі. – 2020. – №4.– С. 22-28.

**Билищук В. Б., Боднар Р. Т.**
Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа

**УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ МЕТОД ВРАЩАЮЩЕЙСЯ КАПЛИ**

*В статье указано особенности применения водных растворов поверхностно-активных веществ в газ нефтедобычи. Указано определяющие параметры таких растворов, которые исследуют при выборе применяемых поверхностно-активных веществ. Проведенный анализ известных методик определения межфазного натяжения методом вращающейся капли показал возможность совершенствования процедуры расчета межфазного натяжения для ее упрощения. В статье предложен усовершенствовать методику расчета межфазного натяжения методом фиксированной вращающейся капли с применением уравнения Воннегута с корректирующим коэффициентом. Значения корректирующего коэффициента было получено по расчетам контуров фиксированных вращающихся капель, а также расчета межфазного натяжения с применением формулы Воннегута на основе рассчитанных контуров. Установлено, что корректирующий коэффициент можно представить как функциональную зависимость от отношения диаметра к длине вращающейся капли. Для проверки такой связи осуществляли расчет коэффициентов корреляции между корректирующим коэффициентом и размерами вращающейся капли. В ходе экспериментальной проверки была подтверждена возможность использования разработанной методики для исследования параметров водных растворов поверхностно-активных веществ с нефтепродуктами.*

*Уравнение Воннегута, межфазное натяжение, поверхностно-активное вещество, нефтепродукты.*

**Bilishchuk V. B., Bodnar R. T.**
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

**ADVANCED METHOD OF ROTARY DROP**

*The article indicates the features of the use of aqueous solutions of surfactants in gas and oil production. The defining parameters of such solutions which are investigated at a choice of the applied surfactants are specified. The analysis of the known methods for determining the interfacial tension by the rotating drop method showed the possibility of improving the procedure for calculating the interfacial tension to simplify it. In the article it is offered to improve a technique of calculation of an interfacial tension by a method of a fixed rotating drop with application of the equation of Vonnegut with a correction factor. The value of the correction factor was obtained from the calculations of the contours of the fixed rotating drops, as well as the calculation of the interfacial tension using the Vonnegut formula based on the calculated contours. It is established that the correction factor can be represented as a functional dependence on the ratio of diameter to the length of the rotating drop. To verify this relationship, the correlation coefficients between the correction factor and the size of the rotating drop were calculated. During the experimental test, the possibility of using the developed technique to study the parameters of aqueous solutions of surfactants with petroleum products was confirmed.*

*Vonnegut equation, interfacial tension, surfactant, petroleum products.*

**© Біліщук В. Б., Боднар Р. Т.**

УДК 616.073+616.43+616.7
**[1]Витвицька Л. А. [2]Дудій П. Ф., [2] Скрипник Н.В., [2]Витвицький З. Я.**
[1]Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
[2]Івано-Франківський національний медичний університет

# УДОСКОНАЛЕНИЙ МЕТОД ТА ПРИСТРІЙ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ УРАЖЕНЬ ЩИТОПОДІБНОЇ ЗАЛОЗИ ТА ОКА ЛЮДИНИ

*Проаналізовано методи діагностики захворювань щитоподібної залози та структур ока. Обгрунтовано доцільність проведення комплексного дослідження на основі ультразвукових методів: кольорового картування, доплерографії та еластографії для встановлення кількісних показників, що характеризують жорсткість м'яких тканин. Запропоновано конструкцію п'єзоелектричного давача, який забезпечує рівність ширини і товщини променя на кожній із глибин сканування. Обгрунтовано спосіб проведення дослідження.*

**Ключові слова:** *ультразвукове дослідження, жорсткість тканин, еластографія, щитоподібна залоза, ендокринна офтальмопатія.*

**Вступ та постановка проблеми.**. Ураження ендокринної системи є складною проблемою сучасної медицини, оскільки відіграє провідну роль у структурі захворюваності населення. За даними багатьох науковців, кількість хворих на дану патологію щороку зростає. Серед усіх захворювань увагу привертає дифузний токсичний зоб (далі - ДТЗ), оскільки часто уражає осіб працездатного віку та характеризується розвитком ускладнень, що веде до втрати працездатності, зниження якості життя, інвалідизації. Найчастішим проявом ДТЗ є ураження органу зору (ендокринна офтальмопатія), при цьому найбільших змін зазнають навколоочні м'язи та жирова клітковина, розташована позаду очного яблука (ретробульбарний простір) [1].

**Мета роботи.** Важливим в діагностиці ендокринної офтальмопатії є розмежування активної та неактивної фази хвороби. У активній фазі запалення відмічається набряк жирової клітковини орбіти та окорухових м'язів, у неактивній фазі – розростання сполучної тканини (фіброз) у цих органах [2]. Оскільки консервативне лікування є можливе тільки в активній фазі, важливим є визначення жорсткості структур орбіти. Ультразвукове дослідження (УЗД) дає можливість візуалізувати структури органу зору. Метод має ряд переваг: висока інформативність, неінвазивність, безболісність, простота виконання і доступність. Класичне УЗД включає В-режим та доплерографію, що допомагають візуалізувати тканини органу зору [3]. Проте, обстеження в даних режимах не дають інформативності про їх жорсткість і унеможливлюють розмежування фаз ендокринної офтальмопатії. Саме тому ставиться задача розроблення додаткового комплексного методу оцінки стану тканин органу зору та щитоподібної залози, який дозволив би визначати їх жорсткість і діагностувати фази захворювання для вибору тактики лікування та контролю перебігу хвороби

**Результати роботи.** Останнім часом активно розробляються різні способи візуалізації зсувних пружних характеристик біологічних м'яких тканин – так звані способи еластографії, які доповнюють традиційні методи візуалізації (ультразвукові, рентгенівські і ін.). Під поняттям еластографії розуміється вимірювання коефіцієнту пружності м'яких тканин, який залежить від їх стійкості до механічного розтягування/стиснення. Ці методи грунтуються на заданні в тканинах зсувів і на їх дистанційному вимірі тим чи іншим чином. Для візуалізації зсувів використовуються ультразвукові методи. Існує два різних методи еластографії, що використовується для дослідження щитоподібної залози: компресійна еластографія (Strain Elastography (SE), якісний, або напівкількісний метод), в якій використовується сила стиснення від руки дослідника з давачем чи від пульсації сонної артерії (квазістатичний). Існує також кількісний варіант еластографії за допомогою хвиль зсуву (Shear Wave Elastography (SWE)), при цьому давач індукує ультразвуковий імпульс, утворюється поперечна хвиля зсуву, яку й вимірюють. Еластографія зсувної хвилі – кількісний метод оцінки пружності тканин. В основі методу лежить фіксація поперечних пружних хвиль, які поширюються в м'яких і твердих тканинах після впливу ультразвуку. Апарат фіксує швидкість поширення зсувних хвиль (визначається прямо пропорційним модулю Юнга

© Витвицька Л. А., Дудій П. Ф., Скрипник Н. В., Витвицький З. Я.

модулем зсуву). На відміну від компресійної еластографії, даний метод дозволяє застосувати як високочастотні, так і низькочастотні давачі, що збільшує глибину сканування без втрат точності. Хоча еластографія зсувної хвилі має деякі недоліки: на якість дослідження впливають різні включення, межі тканин, шуми і артефакти. І все ж, даний метод УЗД вважається найбільш ефективним, оскільки дає можливість не тільки визначити жорсткість тканин, але і розрахувати коефіцієнт їх пружності.

Для задання зсувів використовуються різні джерела, наприклад, низькочастотні пульсації, створені серцем і судинами і досить високочастотні зсувні хвилі, які випромінюються взаємодіючими ультразвуковими пучками або одним фокусованим ультразвуковим пучком за рахунок радіаційного тиску. Найчастіше використовується задання вимушених деформацій в глибині тканин (хвильових або квазістатичних) за допомогою поверхневого джерела. Модальність еластографії, що використовує завдання вібраційних деформацій з поверхні і їх ультразвукову візуалізацію, отримала назву «соноеластографії». Найчастіше для візуалізації пружних параметрів тканин використовуються методи, засновані на кореляційній обробці ехографічних зображень деформованих тканин.

Пропонується спосіб ультразвукового дослідження як щитоподібної залози, так і ретробульбарних структур за допомогою мультипараметричного ультразвукового обстеження, при якому використовується сірошкальний В-режим з кольоровим доплерівським картуванням і режим зсувнохвильової еластографії**.**

Поперечна роздільна здатність УЗ діагностичної системи і, відповідно, якість зображення залежать від ширини УЗ променя. Пропонується використовувати режим динамічного секторного сканування шляхом змінного фокусування ультразвукового променя. Найкращим чином можливості динамічного фокусування забезпечують завдяки застосуванню багатоелементних перетворювачів в давачах електронного лінійного, конвексного і фазованого сканування, а також при механічному скануванню за допомогою кільцевих решіток.

Давач механічного секторного сканування виготовляється з плоского п’єзокерамічного диску шляхом розрізання диску на концентричні кільця, число яких зазвичай не менше 5. Кільця закріплені на загальному демпфері і мають загальні погоджуючі шари.

Кожне із кілець електрично з’єднано з окремим приймачем. Для випромінювання зондуючого сигналу на кільця подаються електричні імпульси. Якщо вони поступають одночасно, то кільцева решітка майже нічим не відрізняється від плоского суцільного одноелементного перетворювача Якщо ж на кільця подають імпульсні сигнали з різним взаємним зсувом в часі, то можна змінювати форму променя. Так, якщо взаємний зсув затримок графічно мають вигляд сферичної поверхні певного радіусу (рисунок 1), то при випроміненні імпульсів окремими кільцями (відповідно в різний час) формується промінь, майже повністю аналогічний променю, що формується сферичним одноелементним перетворювачем з таким же радіусом сферичної поверхні.

На відмінно від давача з перемикаючими перетворювачами давач з кільцевою решіткою дозволяє встановити фокус на будь-якій глибині і отримати складене зображення з будь-якою кількістю фокальних зон.

На рисунку 1 зображені розміри променя – ширина і товщина в зоні фокусу $F_1$ в площині, що проходить через вісь променя перпендикулярно площині сканування [3]**.** Принципова відмінність кільцевих решіток від всіх інших багатоелементних перетворювачів (лінійних, конвексних і секторних) – рівність ширини і товщини променя на кожній із глибин внаслідок того, що промінь має осесиметричну форму.

Вище йшла мова про формування променя на передачу (випромінюючого променю). Відразу ж після випромінювання зондуючи імпульсів давач переходить в режим прийому ехо-сигналів. Просторово-виборчі властивості давача визначаються при цьому формою приймального променя. Якщо на прийом використовується той самий перетворювач, то форма приймального променя практично повторює форму передавального променя. В кільцевій решітці для цього в режимі прийому повинні використовуватись ті ж кільця, а ехо-сигнали, ними прийняті, повинні пройти через такі ж за величиною лінії затримки, що і при випромінені (передачі).. Часто в режимі прийому використовуються не всі кільця – особливо при прийомі з малих глибин. В цьому випадку приймальний промінь за формою відрізняється від передавального.

**© Витвицька Л. А., Дудій П. Ф., Скрипник Н. В., Витвицький З. Я.**

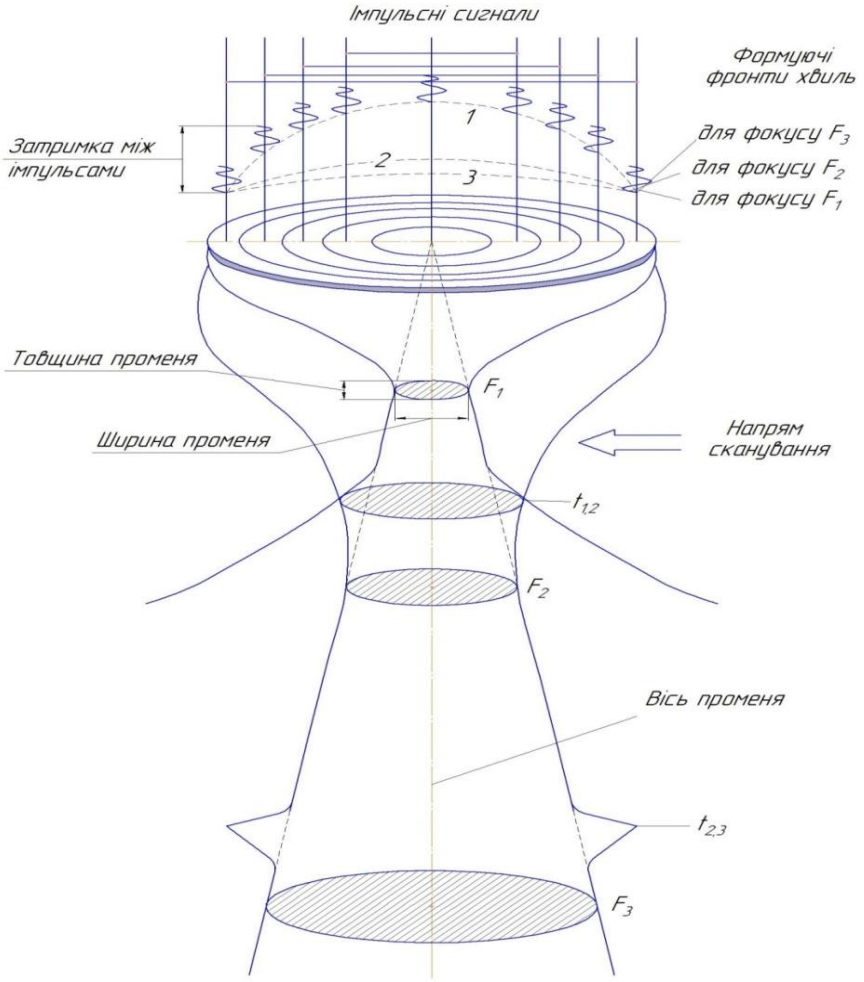



Рисунок 1 – Електронне динамічне фокусування в давачі з кільцевою решіткою. Вигляд складеного УЗ променя

Давач з кільцевою решіткою дозволяє встановити фокус на будь-якій глибині і отримати складене зображення з будь-якою кількістю фокальних зон. В багатоелементному перетворювачі можна оперативно змінювати розмір активної частини апертури (поверхні перетворювача, що випромінює і приймає УЗ сигнали), підключивши більшу або меншу кількість елементів решітки до приймача або передавача сигналів. Зміна розміру апертури а процесі отримання зображення забезпечує більш однорідне зображення по глибині.

Комплексне дослідження щитоподібної залози та ретробульбарного простору ока проводиться в В-режимі з застосуванням доплерографії з наступним визначенням особливостей розташування, розмірів, ехогенності, ехоструктури щитоподібної залози та ретробульбарних структур, основних доплерометричних показників швидкості потоку крові, індексу резистентності в сонній та очній артеріях та додатковим проведенням зсувнохвильової еластографії залози та ретробульбарної клітковини, окорухових м'язів, зорового нерва із встановленням показників швидкості зсувної хвилі при проходженні через досліджуваний об'єкт в м/с та кольорового еластографічного картування .

Ультразвукове двовимірне, доплерівське дослідження щитоподібної залози та ока із застосуванням зсувнохвильової еластографії проводиться таким чином. Положення пацієнта при обстеженні - лежачи на спині. Обидва ока закриті. Спочатку проводиться дослідження залози, а потім очей. Пацієнт дивиться прямо. При дослідженні очей на простерилізований давач наносять бар'єрний чохол, велику кількість гелю та прикладають безпосередньо до повіки, не створюючи компресії. Глибину проникнення коригують до 4 см, фокус встановлюють на 2,5 см, механічний індекс - до 0,23. Давач розміщують в поперечній позиції, направивши його мітку до правої сторони пацієнта. Нахиляють давач «зверху вниз» по площині очного яблука, щоб візуалізувати усі структури. Далі повертають давач на 90° так, щоб мітка

була направлена до тім'яної частини голови пацієнта. Давач нахиляють вправо та вліво. В В-режимі візуалізують очне яблуко. Після оцінки очного яблука проводять оцінку стану ретробульбарних структур. Давач переводять в поперечну позицію, направивши мітку давача до правої сторони пацієнта і в В-режимі візуалізують окорухові м'язи, зоровий нерв та ретробульбарну клітковину навколо нього. Оцінюють їх локалізацію, ехогенність, ехоструктуру. Вимірюють поперечний розмір зорового нерва. Вимірювання проводять на відстані 3 мм вниз від очного яблука. Надалі для вивчення васкуляризації ока при максимально низькому рівні фільтра та оптимальному коефіцієнті підсилення за допомогою кольорового доплерівського картування візуалізують очну артерію. Коли очна артерія візуалізована, вимірюють швидкість кровоплину, пульсаційний індекс та індекс резистентності за допомогою імпульснохвильової доплерографії. Зону ретробульбарних структур поміщують всередину рамки для встановлення якісних показників жорсткості. Проводять кольорове картування, де більш м'які тканини відображаються зеленим та голубим кольорами, а жорсткі - червоним. Для оцінки кількісного показника жорсткості на візуалізовану в В-реживі ділянку ретробульбарної клітковини та окорухового м'яза встановлюють вікно еластометрії і визначають швидкість проходження зсувної хвилі через обстежувану структуру в м/сек. Заміри проводять в трьох точках, з яких визначають середне значення. Далі розміщують вікно та визначають показник швидкості проходження зсувної хвилі на трьох рівнях зорового нерва: біля виходу із очного яблука, посередині зорового нерва та на дистальному відділі очноямкової частини нерва. Визначають середнє значення із трьох ділянок. Відмічають та вносять у протокол дані про розміри, ехогенність, та структуру ретробульбарних структур, доплерометричні показники кровоплину в сонній та очній артерії, показники кольорового картування та швидкості проходження зсувної хвилі в м/с в зоровому нерві, ретробульбарній клітковині та окорухових м'язах. Аналогічно проводять дослідження на другому оці та вносять результати в протокол обстеження пацієнта.

**Висновки** Розроблений удосконалений метод комплексного дослідження щитоподібної залози та очей дозволяє встановити взаємозалежність захворювань і визначити ефективність лікування. Ультразвукове дослідження щитоподібної залози та ретробульбарних структур шляхом проведення діагностики в В-режимі з використанням кольорової доплерографії та зсувнохвильової еластографії забезпечує можливість одержання інформації не тільки про розташування, розміри, ехогенність, ехоструктуру, кровопостачання структур, а також про їх жорсткість. Оцінка цих показників підвищує ефективність діагностики захворювань щитоподібної залози та структур орбіти ока , наприклад, ендокринної офтальмопатії та глаукоми.

**Література**

1. Белодурина А.Д. Топография и клеточный состав жировой клетчатки глазницы. Ее роль в развитии офтальмопатологии/ А.Д. Белодурина, В.А. Бивалькевич// Вестник совета молодых учёных и специалистов Челябинской области. - 2016. - №3 (14). - Т. 3. - С. 74-75.

2. Паньків В.І. Ендокринна офтальмопатія/ В.І. Паньків// Новини фармації. - 2011. - № 10 (365).

3. Синг А.Д. Ультразвуковая диагностика в офтальмологии / Арун Д. Синг, Бренди К. Хейден; пер. с англ. ; под общ. ред. А.Н.Амирова. – М. : МЕДпресс-информ, 2015. – 280 с.

**[1]Vytvytska L. A [2]Dudiy P. F, [2] Skrypnyk N. V, [2]Vytvytsky Z. Ya.**
[1]Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
[2]Ivano-Frankivsk National Medical University

## ADVANCED METHOD AND DEVICE FOR COMPREHENSIVE INVESTIGATION OF THYROID GLAND AND EYES

*Methods of diagnosis of diseases of the thyroid gland and eye structures are analyzed. The expediency of conducting a comprehensive study based on ultrasound methods: color mapping, Doppler and elastography to establish quantitative indicators that characterize the stiffness of soft tissues. The design of a piezoelectric transducer is proposed, which provides equality of beam width and thickness at each of the scan depths. The method of research is substantiated.*

**Key words**: *ultrasound examination, tissue stiffness, elastography, thyroid gland, endocrine ophthalmopathy.*

**© Витвицька Л. А., Дудій П. Ф., Скрипник Н. В., Витвицький З. Я.**

**[1]Витвицкая Л. А. [2]Дудий П. Ф., [2] Скрипник Н.В., [2]Витвицький С. Я.**
[1]Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа
[2]Ин-Франковский национальный медицинский университет

## УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ МЕТОД И УСТРОЙСТВО ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПОРАЖЕНИЯ ЩИТОВИДНОЙ ЖЕЛЕЗЫ И ГЛАЗ ЧЕЛОВЕКА

*Проанализированы методы диагностики заболеваний щитовидной железы и структур глаза. Обоснована целесообразность проведения комплексного исследования на основе ультразвуковых методов: цветного картирования, допплерографии и эластографии для установления количественных показателей, характеризующих жесткость мягких тканей. Предложена конструкция пьезоэлектрического датчика, который обеспечивает равенство ширины и толщины луча на каждой из глубин сканирования. Обоснован способ проведения исследования.*

**Ключевые слова:** *ультразвуковое исследование, жесткость тканей, эластография, щитовидная железа, эндокринная офтальмопатия.*

**© Витвицька Л. А., Дудій П. Ф., Скрипник Н. В., Витвицький З. Я.**

УДК 621.315.592

**Галян[1] В.В., к.ф.-м.н., Іващенко[2] І.А, к.ф.-м.н., Кевшин[1] А.Г., к.ф.-м.н., Шаварова[1] Г.П., к.ф.-м.н.**

*[1]Кафедра експериментальної фізики, інформаційних та освітніх технологій, Волинський національний університет імені Лесі Українки, Україна;*

*[2]Кафедра хімії та технологій, Волинський національний університет імені Лесі Українки, Україна*

# ВИПРОМІНЮВАЛЬНА ТА БЕЗВИПРОМІНЮВАЛЬНА РЕЛАКСАЦІЯ ІОНІВ РІДКІСНОЗЕМЕЛЬНИХ МЕТАЛІВ В МАТЕРІАЛАХ ДЛЯ ОПТОЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ

**(огляд)**

*Проаналізовано електронні конфігурації лантаноїдів та зарядові стани їх іонів. Представлено основні моделі енергетичного обміну між сусідніми іонами рідкісноземельних металів (РЗМ), а також окреслено виникнення процесів кросрелаксації та ап-конверсії. Встановлено вплив локального кристалічного поля на розщеплення рівнів екранованої 4f-оболонки іонів РЗМ. Розщеплення рівнів екранованої 4f-оболонки іонів РЗМ в кристалічних матрицях визначається сукупним впливом сил кулонівської взаємодії, спін-орбітальної взаємодії і слабкою дією статичного кристалічного поля. Показано, що ймовірність безвипромінювальних процесів може змінюватись на декілька порядків в межах одного люмінесцентного центра внаслідок залежності цього процесу від величини енергетичної щілини напівпровідникової матриці. На основі побудови механізмів випромінювальної та безвипромінювальної релаксації іонів РЗМ розглянуто можливості створення ефективних світловипромінюючих середовищ для оптоелектронної техніки.*

***Ключові слова:*** *рідкісноземельний метал, люмінесцентний центр, енергетичний рівень, кросрелаксація, ап-конверсія.*

**Вступ.** Оптичні властивості іонів рідкісноземельних металів (РЗМ) є унікальними, тому широко застосовують в сучасних технологіях, зокрема, в лазерах, люмінофорах, оптичних волокнах, для навігації в системі GPS, оптичних сенсорах і т.п. Процеси, відповідальні за поглинання і випромінювання РЗМ іонів в різних спектральних областях вивчаються протягом декількох десятиліть, оскільки представляють інтерес, як в теоретичному плані, так і для практичного застосування у сучасних оптоелектронних приладах [1-4].

В кристалічних та склоподібних матрицях з різною структурою і хімічним складом положення енергетичних рівнів іонів РЗМ, розподіл ймовірностей перенесення збудження, а також протікання процесів концентраційного гасіння будуть відрізнятися. Отже, точно передбачити всю сукупність фізичних властивостей, пов'язаних з впливом матриці на іони РЗМ, з використанням теоретичних методів дослідження становить досить складну задачу. Внутріцентрові 4f-переходи в РЗМ слабо залежать від локального оточення іона. Крім того, завдяки особливостями структури електронних спектрів, зокрема, наявності декількох метастабільних станів, а також повільної безвипромінювальної релаксації проміжних електронних рівнів, мають високу ефективність різні моделі ап-конверсії, побудовані в системі енергетичних рівнів іонів РЗМ.

З огляду на актуальність теми дослідження, у цій статті проаналізовано електронні конфігурації лантаноїдів, переходи в 4f-оболонці, а також випромінювальну та безвипромінювальну релаксацію іонів РЗМ в різних кристалічних та аморфних середовищах.

**1. Формування енергетичних рівнів та переходів в 4f-оболонці іонів РЗМ.** До групи РЗМ в періодичній системі Д. І. Менделєєва відносять елементи від лантана (La) до лютеція (Lu), а також ітрій (Y) та скандій (Sc). В цих елементах відбувається поступове заповнення 4f-оболонки, що розташована під шаром зовнішніх 5s-, 5p- і 6s-оболонок. Максимально можливо число електронів на f-оболонці дорівнює 14, що визначає число елементів сімейства лантаноїдів. Електронну конфігурацію лантаноїдів з використанням атома ксенона записують у вигляді:

$$[\mathrm{Xe}](4f^{n})(5d^{x})(6s^{2}) \qquad (1)$$

**© Галян В.В., Іващенко І.А, Кевшин А.Г., Шаварова Г.П.**

Валентними є електрони на $6s^2$ оболонці, відривання яких відповідає утворенню іонів РЗМ в зарядовому стані +2. Крім того, валентними є електрони $6s^25d^1$ або $6s^24f$, відривання яких відповідає зарядовому стану +3.

Іони РЗМ найчастіше зустрічаються в стані +3 через поєднання низької енергії іонізації і високої енергії сольватації [5]. Інші стабільні ступені окислення, наприклад, церій (+4) і європій (+2) виникають внаслідок відносної стійкості наполовину порожньої або повністю заповненої 4f-оболонки.

Основні властивості іонів РЗМ в зарядовому стані +3, пов'язані з процесами поглинання або випромінювання світла, що визначаються внутрішньоконфігураційними переходами між $4f^n$-станами, а також міжконфігураційними переходами між $4f^n$- і 5d-станами. Завдяки наявності в іонів РЗМ повністю заповнених $5s^2$- і $5p^6$- оболонок, електрони, що знаходяться на рівнях $4f^n$ оболонки, практично повністю захищені від впливу зовнішнього кристалічного поля або поля склоутворюючої матриці. Екрануючий ефект зовнішніх оболонок зменшується зі збільшенням атомного номера РЗМ. Крім того, внаслідок дії сил притягування між електронами і ядром з ростом атомного номера, відбувається стиснення всіх електронних оболонок, зниження їх енергій, що призводить до зменшення радіуса атомів і іонів.

В електронній конфігурації $4f^n$ лантаноїдів може існувати декілька енергетичних станів, які позначають $^{2S+1}L_J$ (S – загальний спіновий момент, L – загальний атомний орбітальний момент, J – повний кутовий момент. Стани $^{2S+1}L_J$ знаходять наступним чином: f-електрони можуть займати сім 4f-орбіталей, поки два електрони не отримають однаковий набір квантових чисел (принцип Паулі). Враховуючи електростатичні взаємодії між 4f-електронами і групуючи стани з однаковою енергією, зрозуміло, що енергетичні рівні іонів РЗМ конфігурації $4f^n$ розщеплюються на $^{2S+1}L$ підрівнів [6]. Спін-орбітальна взаємодія теж впливає на розщеплення рівнів. Вона виникає між спіном магнітного моменту електрона і полем, що створюється рухом електрона навколо ядра. У випадку, коли відштовхування електронів набагато більше спін-орбітальної взаємодії, змішанням різних $^{2S+1}L$ термів можна знехтувати і рівні розщеплюються на $^{2S+1}L_J$ підрівні. Повний кутовий момент J задається зв'язком L і S. Таке наближення називають схемою Рассела-Саундерса. Якщо спін-орбітальна взаємодія більша, ніж відштовхування електронів, реалізується схема J-J зв'язку. За таких умов змішуються підрівні з однаковим значенням J, але з різними L і S. Іони РЗМ найкраще описуються проміжною моделлю зв'язку, в якій власними значеннями енергій рівнів є лінійні комбінації станів Рассела-Саундерса. Окремі рівні енергії в енергетичних діаграмах лантаноїдів описуються в термінах рівнів Рассела-Саундерса [7].

Позначення $^{2S+1}L_J$ визначає стан вільного іона РЗМ. При поміщенні його в будь-яку кристалічну чи склоподібну матрицю сферична симетрія вільного іона руйнується внаслідок впливу оточуючих лігандів, які обумовлюють електростатичну взаємодію між 4f-електронами РЗМ і своїм електричним полем. Окремі J-рівні розщеплюються на підрівні завдяки впливу оточуючого поля, однак це розщеплення незначне внаслідок ефективного екранування f-електронів. В таблиці 1 наведені енергетичні рівні основної $4f^n$-конфігурації вільних іонів РЗМ. Розглянемо, як приклад, іон $Nd^{3+}$. Він має електронну конфігурацію $[Xe]4f^3$. Електрони знаходяться на 4f-оболонці, тому головне квантове число n = 4, а орбітальне квантове число l = n-1 = 3. Три f-електрони, розміщуючись по можливим $2\cdot(2l + 1)$ рівням дадуть повне спінове квантове число S = 3/2, тоді мультиплетність буде рівна 2S + 1 = 4. Для трьох електронів значення повного орбітального моменту $L=|\Sigma l_z|=1+2+3=6$. Для іона неодиму електронні оболонки заповнені менше, ніж наполовину, тому квантове число повного моменту J = L–S = 6 + 3/2 = 9/2. В результаті запишемо позначення терма основного стану іона $Nd^{3+}$ у вигляді $^4I_{9/2}$. Подібні розрахунки можна здійснити для інших іонів РЗМ.

Таблиця 1.

Структура основної конфігурації вільних іонів РЗМ

| Іон | Основна конфігурація | Терм | Основний мультиплет |
|---|---|---|---|
| $Ce^{3+}$ | $4f^1$ | $^2F$ | $^2F_{5/2}$ |
| $Pr^{3+}$ | $4f^2$ | $^3H$ | $^3H_4$ |
| $Nd^{3+}$ | $4f^3$ | $^4I$ | $^4I_{9/2}$ |
| $Pm^{3+}$ | $4f^4$ | $^5I$ | $^5I_4$ |
| $Sm^{3+}$ | $4f^5$ | $^6H$ | $^6H_{5/2}$ |
| $Eu^{3+}$ | $4f^6$ | $^7F$ | $^7F_0$ |

© Галян В.В., Іващенко І.А, Кевшин А.Г., Шаварова Г.П.

| | | | |
|---|---|---|---|
| $Cd^{3+}$ | $4f^7$ | $^8S$ | $^8S_{7/2}$ |
| $Tb^{3+}$ | $4f^8$ | $^7F$ | $^7F_6$ |
| $Dy^{3+}$ | $4f^9$ | $^6H$ | $^6H_{15/2}$ |
| $Ho^{3+}$ | $4f^{10}$ | $^5I$ | $^5I_8$ |
| $Er^{3+}$ | $4f^{11}$ | $^4I$ | $^4I_{15/2}$ |
| $Tm^{3+}$ | $4f^{12}$ | $^3H$ | $^3H_6$ |
| $Yb^{3+}$ | $4f^{13}$ | 2F | $^2F_{7/2}$ |

Отже, вплив кристалічного поля полягає у розщепленні на мультиплетні рівні (LS-терми) вільного іона внаслідок спін-орбітальної взаємодії. Надалі відбувається розщеплення мультиплетів слабким кристалічним полем на штарківські рівні, які визначаються повним квантовим числом J і симетрією кристалічного поля.

Розщеплення рівнів екранованої $4f^n$-конфігурації іонів РЗМ в кристалічних матрицях визначається сукупним впливом сил кулонівської взаємодії (розщеплення становить ~ $10^4$ $см^{-1}$), спін-орбітальної взаємодії (величина розщеплення ~ $10^3$ $см^{-1}$) і слабкою дією статичного кристалічного поля (величина розщеплення ~ $10^2$ $см^{-1}$) (рис. 1.1).

З електронної конфігурації іонів РЗМ однозначно можна визначити повну схему енергетичних рівнів. В $60^x$ роках минулого століття вперше були побудовані схеми енергетичних рівнів для всіх $4f^n$ конфігурацій в ультрафіолетовій, видимій та інфрачервоній областях спектру (названі діаграмами Діке). Вони справедливі для іонів РЗМ в різних кристалічних матрицях внаслідок невеликого внеску величини розщеплення кристалічним полем.

Переходи між 4f-рівнями відбуваються в межах частково заповненої $4f^n$-конфігурації іонів РЗМ, що відображається в спектрах поглинання та люмінесценції у вигляді мало інтенсивних вузьких смуг, виявляючи тонку структуру. Такі переходи заборонені правилом

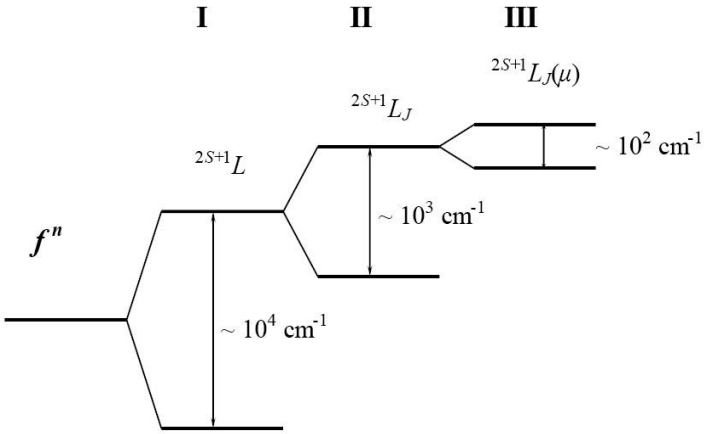



Рис. 1. Схема розщеплення енергетичних 4f-рівнів іона РЗМ згідно [7]:
I - кулонівська взаємодія; II - спін-орбітальна взаємодія;
III - взаємодія з кристалічним полем

Лапорта, згідно з яким парність початкового і кінцевого станів повинні бути протилежні. Правило виконується в спектрах для вільних іонів, але порушується при їх введенні в кристалічне / склоподібне середовище завдяки нецентросиметричним взаємодіям, що обумовлює змішування станів різної парності.

Слабка взаємодія електронів 4f-оболонки з оточуючим полем лігандів і, відповідно, слабка фононна взаємодія призводить до того, що оптичні спектри, які характеризують переходи між різними станами основної $4f^n$-конфігурації, мають лінійчату структуру, невеликі зсуви при переході від одного середовища до іншого і невелике розширення ліній (близько 10-100 $см^{-1}$). Симетрія поля в різних середовищах визначає різне число ліній тонкої структури та їх відносну інтенсивність, обумовлену правилами відбору для переходів між штарківськими рівнями. Основні принципи розрахунку інтенсивностей електро-дипольних радіаційних $4f^n \leftrightarrow 4f^n$-переходів були запропоновані незалежно Джаддом і Оффельтом [8, 9].

**2. Випромінювальна та безвипромінювальна релаксація в люмінесцентних центрах**

В іонах РЗМ, як і в люмінесцентних центрах, основними процесами є випромінювальна та безвипромінювальна релаксація, а також різні кооперативні процеси. Вказані явища дають внесок у час життя збудженого стану, який можна записати формулою [10]:

$$\tau_i = \frac{1}{\sum_j w_{ij}^R + w_{ij}^{NR}} \quad (2)$$

Де $w_{ij}^R$ – ймовірність випромівальних процесів зі стану $i$ в стан $j$; $w_{ij}^{NR}$ – сумарна ймовірність безвипромінювальних і кооперативних процесів.

Процес називають випромінювальним, якщо при переході електрона зі збудженого в основний стан виникає фотон. Ймовірність спонтанного випромінювального переходу між $\Psi_i$ (початковим) і $\Psi_j$ (кінцевим) станами визначається коефіцієнтом Енштейна $A_{ji}$.

$$A_{ji} = \frac{64\pi^4 \vartheta_{ji}^3}{3hc^3 g_i} \left| < \Psi_j | P | \Psi_i > \right|^2 \quad (3)$$

де $\vartheta_{ji}$ – частота переходу, $g_i$ – ступінь виродження початкового стану, $P$ – оператор переходу.

В іонах РЗМ всі переходи відбуваються між станами в однаковій електронній конфігурації 4f. Вони є заборонені в електричному дипольному наближенні внаслідок дії правила відбору парності. Не всі спектральні лінії, які спостерігають в експерименті, можна віднести до магнітних дипольних і електричних квадрупольних переходів. Слабкі сили осциляторів свідчать, що переходи відбуваються внаслідок впливу поля середовища, в якому знаходяться люмінесцентні центри, що змішує непарні компоненти з електронними станами 4f, які мають протилежну парність. У ймовірність випромінювального процесу додатковий вклад вносять коливання кристалічної решітки, що виражається електрон-фононною взаємодією.

Електронно-коливні смуги відповідають переходам між основним коливним станом збудженого електронного рівня і збудженими коливними станами нижчого електронного рівня. Вони є менше інтенсивними, в порівнянні зі смугами, що відповідають чисто електронному переходу і спостережувані в довгохвильовому спектральному діапазоні. Електронно-коливні лінії зміщуються в короткохвильову область спектру порівняно з електронним переходом при підвищенні температури, оскільки відбувається заселення коливних рівнів збудженого стану. Інтенсивність цих електронно-коливних смуг є мірою електрон-фононної взаємодії.

Всі процеси в люмінесцентних центрах відбуваються незалежно один від одного, якщо їх концентрація досить мала. Такими процесами є: поглинання та випромінювання світла, а також безвипромінювальні переходи, при яких енергія збудження витрачається на утворення декількох фононів.

Енергетична відстань $\Delta E_{ij}$ визначає ймовірність безвипромінювального переходу $w_{ij}^R$ між станами $i$ та $j$. Ймовірність $w_{ij}^{NR}$ залежить від кількості коливних квантів, які беруть участь у безвипромінювальному процесі. В твердих тілах енергія кванта, що виникає внаслідок коливання атомів решітки, обмежена максимальним значенням $h\nu_{max}$. Якщо енергія $\Delta E_{ij}$ більша $h\nu_{max}$, то для реалізації безвипромінювального переходу потрібна одночасна участь декількох коливних квантів (фононів). Очевидно, що ймовірність такого процесу значно менша ніж ймовірність процесу, в якому бере участь один квант. Отже, чим більше число фононів необхідно для здійснення безвипромінювального процесу, тим менше ймовірний такий процес.

Подальша трансформація поглинутої енергії (після переходу люмінесцентного центру в збуджений стан) залежить від співвідношення між ймовірністю випромінювальних та безвипромінювальних переходів. У випадку збудження світлом іонів РЗМ електрон, як правило, потрапляє на енергетичний рівень, для якого ймовірним є безвипромінювальний перехід на нижчий рівень [11, 12]. Безвипромінювальні переходи відбуваються, поки люмінесцентний центр не виявиться в стані, для якого ймовірність випромінювального переходу більша за безвипромінювальну [13, 14]. Такий енергетичний рівень і стан іона РЗМ називають метастабільним [15].

Найцікавішими, з точки зору застосування в оптоелектронній техніці, є переходи у видимій і близькій інфрачервоній ділянках спектру. Їх енергія в декілька разів перевищує

енергію коливальних квантів, тому для здійснення безвипромінювального переходу необхідна участь одночасно декількох фононів. Теоретичний аналіз та експериментальні дослідження [10, 16] дають вираз для ймовірності безвипромінювальних переходів:

$$W(\Delta E) = Ce^{-\alpha \Delta E} \quad (4)$$

де $C$, $\alpha$ – параметри, що залежать від середовища (кристалічної / аморфної матриці), в яке введено РЗМ і не залежать від природи люмінесцентного іона та станів між якими відбувається перехід.

Результати досліджень ФЛ для напівпровідників легованих РЗМ [17] свідчать, що ймовірність безвипромінювальних процесів може змінюватись на декілька порядків в межах одного люмінесцентного центра внаслідок залежності цього процесу від величини енергетичної щілини ΔЕ напівпровідникової матриці. Тому ймовірність безвипромінювальних процесів в різних матрицях значно відрізняється і, відповідно, є різними їх люмінесцентні властивості.

Окремим видом безвипромінювальної релаксації є згасання люмінесценції на домішках. Особливо «небезпечними» для випромінювання іонами РЗМ є коливальні кванти групи $OH^-$, що ефективно зумовлюють гасіння ФЛ в інфрачервоному спектральному діапазоні. Це явище враховують при виготовленні оптоволокна, в якому передачу сигналу здійснюють на довжині хвилі близько 1,5 мкм.

Зі збільшенням концентрації люмінесцентних центрів стає можливим їх взаємодія. Результатом такої взаємодії може стати перехід енергії збудження з одного на інший люмінесцентний центр. Такий процес називають передаванням збудження або енергетичним трансфером, що часто зустрічається в легованих ербієм напівпровідниках [18, 19]. Передавання енергії збудження зменшує квантовий вихід і час згасання люмінесценції, оскільки частина енергії збудження замість випромінювального переходу йде до іншого центру (акцептора). Якщо після передавання енергії збудження акцептору електрон потрапляє на метастабільний рівень, тоді можливий процес випромінювання. Зауважимо, що акцептор починає випромінювати, незважаючи на те, що безпосередньо світлом він не збуджується. Таке явище називають «сенсабілізацією» люмінесценції акцептора, а донор (центр, що передає енергію) – «сенсабілізатором».

Якщо іони РЗМ не мають метастабільного енергетичного рівня, тоді вони не випромінюють кванти світла. Це відбувається у випадку, коли в акцептора є багато рівнів, енергетичні відстані між якими менше максимальної енергії коливального кванту. Тоді енергія збудження акцептора трансформується в коливання кристалічної / склоподібної матриці або домішки.

Енергія, якою обмінюються люмінесцентні центри може ділитись між донором і акцептором. Такий процес називають кросрелаксацією. Прикладом є кросрелаксація в іонах $Nd^{3+}$ (рис. 2). Донорний центр знаходиться на метастабільному рівні $^4F_{3/2}$, а акцептор – в

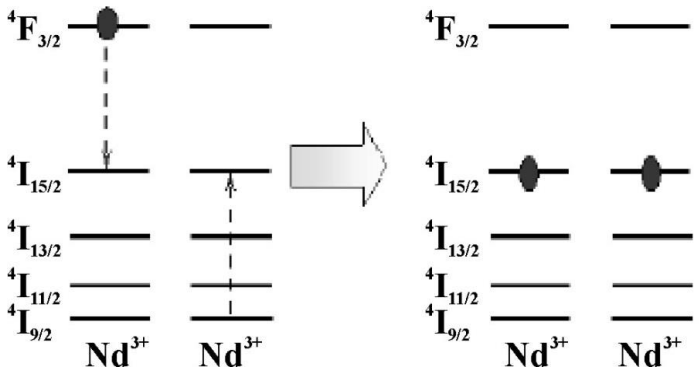



Рис. 2. Схема кросрелаксації іонів $Nd^{3+}$ [15]

основному стані $^4I_{9/2}$. Внаслідок кросрелаксації обидва іона переходять в стан $^4I_{15/2}$. Його енергія рівна, приблизно, половині енергії метастабільного стану $^4F_{3/2}$. В стані $^4I_{15/2}$, іони неодиму тривалий час не знаходяться, оскільки швидкість релаксації на найближчий нижній рівень $^4I_{13/2}$ досить велика. Тому енергія збудження неодимового центру трансформується в коливання матриці або домішки.

© Галян В.В., Іващенко І.А, Кевшин А.Г., Шаварова Г.П.

Отже, для неодимових люмінесцентних центрів кросрелаксація є процесом, що знижує квантовий вихід випромінювання. Зауважимо, що кросрелаксацію можна використати для збільшення ймовірності необхідного процесу випромінювання, наприклад, для підвищення ефективності накачування лазера [15].

В напівпровідниках легованих РЗМ існує зворотній процес по відношенню до кросрелаксації, який називають – ап-конверсія. Нехай передавання енергії відбувається між центрами, які знаходяться у збудженому стані. Тоді може відбутись процес, внаслідок якого один з центрів (донор) виявиться в основному стані, а інший (акцептор) – у вищому збудженому стані, енергія якого дорівнює сумі енергій донора і акцептора до їх взаємодії (рис. 3).

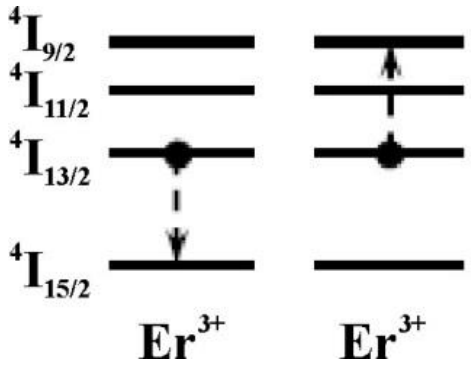



Рис. 3. Схема ап-конверсії в іонах $Er^{3+}$ [15]

Отже, при ап-конверсії, енергія декількох центрів зосереджується на одному центрі, а при кросрелаксації навпаки – енергія одного центру ділиться між двома [20, 21]. Залежно від співвідношення ймовірностей випромінювальних і безвипромінювальних переходів збудженого стану іону РЗМ, ап-конверсія може виконувати функцію гасіння люмінесценції або бути способом накачування рівнів з високою енергією. У першому випадку – це явище негативно впливає на ефективність випромінювання, а в другому – використовується в оптоелектронних приладах для перетворення світла з інфрачервоного у видимий спектральний діапазон.

**Висновки.** У статті проведено аналіз електронних конфігурацій іонів РЗМ. Встановлено, що розщеплення рівнів екранованої $4f^n$-конфігурації іонів РЗМ в кристалічних матрицях визначається сукупним впливом сил кулонівської, спін-орбітальної взаємодії та слабкою дією статичного кристалічного поля. Слабка взаємодія електронів 4f-оболонки з оточуючим полем лігандів і слабка фононна взаємодія обумовлює лінійчату структуру оптичних спектрів, між різними станами 4f-оболонки іонів РЗМ.

При низькій концентрації люмінесцентних центрів процеси, які в них відбуваються не залежать один від одного. Зі збільшенням кількості люмінесцентних центрів стає можливим енергетичний трансфер, що характеризується переходом енергії збудження з одного на інший люмінесцентний центр. Завдяки кросрелаксації енергетичний обмін може відбуватись також із поділом енергією між донорним і акцепторним центром. В напівпровідниках легованих РЗМ існує зворотній процес, коли енергія декількох центрів випромінювання зосереджується на одному центрі. Знання механізмів і побудова моделей безвипромінювальної / випромінювальної релаксації та передачі енергії від одного люмінесцентного центру до іншого створює передумови для конструювання ефективних світловипромінюючих середовищ для оптоелектронної техніки.

**Інформаційні джерела**

1. Галян В. В. Випромінювання світла в халькогенідних монокристалах систем Ga–In(La)–S та склоподібних сплавах утворених бінарними халькогенідами $Ag_2S(Se)$, HgS, $Ga(La)_2S(Se)_3$, $GeS_2$ легованих ербієм : дис. докт. фіз.-мат. наук : 01.04.10 / Галян Володимир Володимирович – Ужгород, 2020. – 325 с.

2. Halyan V. V. Mechanism of photoluminescence in erbium-doped chalcogenide / V. V. Halyan, I. A. Ivashchenko, in book: Luminescence – OLED Technology and Applications, edited by prof. S. L. Pyshkin. – Intechopen, 2018. – P. 1–22.

**© Галян В.В., Іващенко І.А, Кевшин А.Г., Шаварова Г.П.**

3. Кевшин А. Г. Процеси трансформації енергії в активованих йонами $Er^{3+}$ лазерних матеріалах (огляд) / А. Г. Кевшин, В. В. Галян, Т. А. Семенюк // Фізика і хімія твердого тіла. – 2015. – Т. 16. – С. 245–252.

4. Exploration of Nonlinear Optical Features of $Ga_2S_3$–$La_2S_3$ Glasses for Optoelectronic Applications / A. M. El Naggar, A. A. Albassam, G. Lakshminarayana, V. V. Halyan, I. A. Ivashchenko, A. H. Kevshyn // Glass Phys. Chem. – 2019. – V. 45. – P. 467–471.

5. Cotton S. Lanthanide and actinide chemistry / S. Cotton. – John Wiley & Sons, 2013. – 272 p.

6. Шпольский Э. З. Атомная физика. Т. 2. Основы квантовой механики и строение электронных оболочек атома / Э. З. Шпольский. – М. : Наука, 1974. – 447 с.

7. Пустоваров В. А. Люминесценция и релаксационные процессы в диэлектриках : учебное пособие / В. А. Пустоваров. – Екатеринбург : Уральский федеральный университет, 2015. – 113 с.

8. Judd B. R. Optical Absorption Intensities of Rare-Earth Ions / B. R. Judd // Phys. Rev. – 1962. – V. 127. – P. 750–761.

9. Ofelt G. S. Intensities of Crystal Spectra of Rare-Earth Ions / G. S. Ofelt // J. Chem. Phys. – 1962. – V. 37. – P. 511–520.

10. Weber M. J. Probabilities for Radiative and Nonradiative Decay of $Er^{3+}$ in LaF / M. J. Weber // Phys. Rev. – 1967. – V. 157. – P. 262–272.

11. Mechanism of anti-stokes photoluminescence in $Ag_{0.05}Ga_{0.05}Ge_{0.95}S_2$–$Er_2S_3$ glassy alloys / V. V. Halyan, A. H. Kevshin, G. Ye. Davydyuk, N. V. Shevchuk // Glass Phys. Chem. – 2013. – V. 39. – P. 52–56.

12. Growth of the $(Ga_{69.5}La_{29.5}Er)_2S_{300}$ Single Crystal and Mechanism of Stokes Emission / V. V. Halyan, I. A. Ivashchenko, A. H. Kevshyn, I. D. Olekseyuk, P. V. Tishchenko, A. P. Tretyak // J. Nano- Electron. Phys. – 2019. – V. 11. – P. 01008-1–01008-4.

13. NIR and visible luminescence features of erbium doped $Ga_2S_3$–$La_2S_3$ glasses / I. V. Kityk, V. V. Halyan, V. O. Yukhymchuk, V. V. Strelchuk, I. A. Ivashchenko, Ya. Zhydachevskii, A. Suchocki, I. D. Olekseyuk, A. G. Kevshyn, M. Piasecki // J. Non Cryst Solids. – 2018. – V. – 498. – P. 380–385.

14. Photoluminescence features and nonlinear-optical properties of the $Ag_{0.05}Ga_{0.05}Ge_{0.95}S_2$–$Er_2S_3$ glasses / V. V. Halyan, V. O. Yukhymchuk, Ye. G. Gule, K. Ozga, K. J. Jedryka, I. A. Ivashchenko, M. A. Skoryk, A. H. Kevshyn, I. D. Olekseyuk, P. V. Tishchenko, M. V. Shevchuk, M. Piasecki // Opt. Mater. – 2019. – V. 90. – P. 84–88.

15. Пржевуский А. К. Конденсированные лазерные среды : учебное пособие / А. К. Пржевуский, Н. В. Никоноров. – СПб. : СПбГУ ИТМО, 2009. – 147 с.

16. Weber M. J. Radiative and multiphonon relaxation of rare-earth ions in $Y_2O_3$ / M. J. Weber // Phys. Rev. – 1968. – V. 171, № 2. – P. 283–291.

17. Галян В. В. Випромінювання світла в халькогенідних монокристалах систем Ga–In(La)–S та склоподібних сплавах утворених бінарними халькогенідами $Ag_2S(Se)$, HgS, $Ga(La)_2S(Se)_3$, $GeS_2$ легованих ербієм : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. фіз.-мат. наук : спец. 01.04.10 "фізика напівпровідників і діелектриків" / Галян Володимир Володимирович – Ужгород, 2020. – 44 с.

18. Role of structural ordering on optical properties of the glasses $Ag_{0,05}Ga_{0,05}Ge_{0,95}S_2$–$Er_2S_3$ / V. V. Halyan, V. V. Strelchuk, V. O. Yukhymchuk, A. H. Kevshyn, G. Ye. Davydyuk, M. V. Shevchuk, S. V. Voronyuk // Physica B Condens. Matter. – 2013. – V. 411. – P. 35–39.

19. Green, red and infrared luminescence in glasses of the system $Ag_{0,05}Ga_{0,05}Ge_{0,95}S_2$-$Er_2S_3$ / V. V. Halyan, A. H. Kevshyn, H. Ye. Davydyuk, M. V. Shevchuk // J. Phys. Stud. – 2012. – V. 16. – P. 3705-1–3705-5.

20. Effect of temperature on the structure and luminescence properties of $Ag_{0.05}Ga_{0.05}Ge_{0.95}S_2$–$Er_2S_3$ glasses / V. V. Halyan, I. V. Kityk, A. H. Kevshyn, I. A. Ivashchenko, G. Lakshminarayana, M. V. Shevchuk, A. Fedorchuk, M. Piasecki // J. Lumin. – 2017. – V. 181. – P. 315–320.

21. EPR of γ-induced defects and their effects on the photoluminescence in the glasses of the $Ag_{0.05}Ga_{0.05}Ge_{0.95}S_2$–$Er_2S_3$ system / V. V. Halyan, A. A. Konchits, B. D. Shanina, S. V. Krasnovyd, O. O. Lebed, A. H. Kevshyn, M. V. Shevchuk, A. V. Bodnaruk, V. O. Yukhymchuk // Radiat. Phys. Chem. – 2015. – V. 115. – P. 189–195.

**© Галян В.В., Іващенко І.А, Кевшин А.Г., Шаварова Г.П.**

**Галян[1] В.В., к.ф.-м.н., Иващенко[2] І.А, к.ф.-м.н., Кевшин[1] А.Г., к.ф.-м.н., Шаварова[1] Г.П., к.ф.-м.н.**
[1]Кафедра экспериментальной физики, информационных и образовательных технологий, Волынский национальный университет имени Леси Украинский, Украина;
[2] Кафедра химии и технологий, Волынский национальный университет имени Леси Украинский, Украина

## ИЗЛУЧАТЕЛЬНАЯ И БЕЗЫЗЛУЧАТЕЛЬНАЯ РЕЛАКСАЦИЯ ИОНОВ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ В МАТЕРИАЛАХ ДЛЯ ОПТОЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ (ОБЗОР)

*Проанализированы электронные конфигурации лантаноидов и зарядовые состояния их ионов. Представлены основные модели энергетического обмена между соседними ионами редкоземельных металлов (РЗМ), а также обозначены процессы возникновения кросрелаксации и ап-конверсии. Установлено влияние локального кристаллического поля на расщепление уровней экранированной 4f-оболочки ионов РЗМ. Расщепление уровней экранированной 4f-оболочки ионов РЗМ в кристаллических матрицах определяется совокупным влиянием сил кулоновского взаимодействия, спин-орбитального взаимодействия и слабым действием статического кристаллического поля. Показано, что вероятность безызлучательных процессов может изменяться на несколько порядков в пределах одного люминесцентного центра вследствие зависимости этого процесса от величины энергетической щели полупроводниковой матрицы. На основе построения механизмов излучательной и безызлучательной релаксации ионов РЗМ рассмотрены возможности создания эффективных светоизлучающих сред для оптоэлектронной техники.*

**Ключевые слова:** *редкоземельный металл, люминесцентный центр, энергетический уровень, кросрелаксация, ап-конверсия.*

**Halyan[1] V.V., Ph.D., Ivashchenko[2] I.A, Ph.D., Kevshyn[1] A.H., Ph.D., Shavarova[1] G.P. Ph.D.**
[1]Department of Experimental Physics, Information and Educational Technologies, Lesya Ukrainka Volyn National University
[2]Department of Chemistry and Technology, Lesya Ukrainka Volyn National University

## RADIATIVE AND NON-RADIATIVE RELAXATION OF RARE-EARTH IONS IN MATERIALS FOR OPTOELECTRONIC DEVICES (REVIEW)

*Electronic configurations of lanthanides and charge states of ions are analyzed. The main models of energy exchange between neighboring of rare-earth (RE) ions are presented, as well as the emergence of cross-relaxation and ap-conversion processes is outlined. The influence of the local crystal field on the splitting of levels of the shielded 4f-shell in RE ions has been established. The splitting of levels the shielded 4f-shell of RE ions in crystal matrices is determined by the combined influence of the Coulomb interaction forces, the spin-orbit interaction, and the weak action of the static crystal field. It is shown that the probability of non-radiative processes can vary by several orders of magnitude within one luminescent center due to the dependence of this process on the size of energy gap of the semiconductor matrix. Based on the construction of mechanisms of radiative and non-radiative relaxation of RE ions, the possibilities of creating effective light-emitting media for optoelectronic technology are considered.*

**Key words:** *rare earth metal, luminescent center, energy level, cross-relaxation, ap-conversion.*

**© Галян В.В., Іващенко І.А, Кевшин А.Г., Шаварова Г.П.**

УДК 351:316.614.5:305(477)
**Григор'єва, Н.С, Гуменюк Л.О, Марчук І.В., Собчук Д.С., Шабайкович В.А.**
Луцький національний технічний університет

# ВПЛИВ ПАНДЕМІЇ КОРОНАВІРУСУ НА ВИРОБНИЦТВО ТА МЕДИЧНЕ ОБСЛУГОВУВАННЯ

*Розглянуто заходи боротьби з пандемією коронавірусу при лікуванні захворювання коронавірусом, організації нормального функціонування виробництва та адаптації соціальної сфери обслуговування. Перший напрямок - основний, пов'язаний із заходами підготовки медичного персоналу, ліків, обладнання, оснащення, спеціалістів-лікарів, тестування, вакцинації. Досягається виключно при комплексному аналізі та синтезі рівня медицини, конструкції та технології виробів, організації виготовлення, внутрішнього та зовнішнього середовища. Забезпечення нормального функціонування виробництва досягається шляхом його реорганізації, дезінфекції виробничих потужностей, використання автоматичного обладнання та оснащення, захист виробничого персоналу тощо. Зміни в соціальній сфері обслуговування включають її адаптацію до пандемії коронавірусу, реорганізацію транспортних потоків, послуг, заборони, обмеження та пристосованість до навколишнього середовища. Обов'язкове врахування причин пандемії коронавірусу.*

**Ключові слова***: коронавірус, медицина, пандемія, заходи, заборони.*

**Постановка проблеми**

Серед багатьох проблем сучасності несподівано виникла гостра проблема пандемії коронавірусу, котра вплинула на всі сфери життя. По-перше, точно невідомо звідкіля взявся коронавірус. Версія, що він вийшов з ринку Уханя в Китаї, не витримує ніякої критики: хоча б серед перших 41 зареєстрованих хворих, заражених новим коронавірусом, безпосередній контакт із ринком в Ухані мали лише 27 людей. Не причому тут і зараження від кажанів і змій, оскільки раніше саме таких заражень не спостерігалось. По-друге, взаємні обвинувачення між Китаєм та США про зараження без наведення будь-яких доказів виглядають натягнуто. Залишаються лабораторії біологічної зброї, але і тут одні припущення, як і в інших випадках. Шкода, що нема ще посилань на космос, інфраструктуру, атмосферу тощо. Перший коронавірус людини було виділено у 1965 році вченими D.Tyrrell та M. Bynoe від хворих на гостру респіраторну вірусну інфекцію. Самостійна родина коронавірусів була сформована у 1968 році. Побудова варіона коронавіруса **SARS-CoV-2 наведена на рис. 1. Діаметри різних вірусів коливаються в межах 80-220 нм, походження зовнішньої форми невідоме.** Кінцева частина кожного шипа "імітує" молекулу корисної речовини, тому клітинні рецептори самі затягують її у себе, а за шипом до клітини потрапляє весь вірус. Механізм зараження організму коронавірусом полягає в тому, що при інфікуванні білковий шип на поверхні вірусу SARS-CoV2 прикріплюється до білка-рецептора на поверхні клітин людини і проникає в них [1].

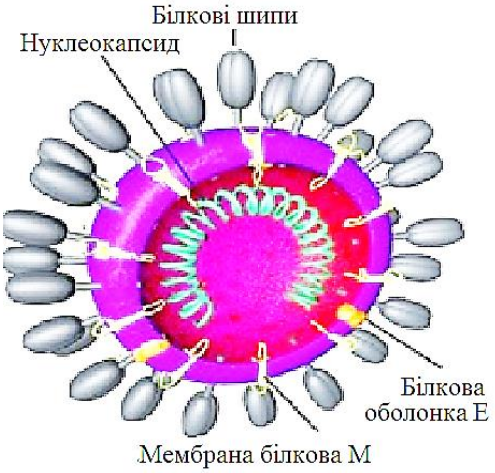



Рис. 1. Побудова віріона коронавіруса SARS-CoV-2

**Метою статті** є покращення довкілля в умовах пандемії коронавіруса за рахунок заходів і зменшених витрат на антикризову боротьбу з окремими її частинами: технічною, медичною та соціальною.

**Викладення основного матеріалу дослідження**

Причинами зараження коронавірусом є мутації, в результаті яких появляється новий тип вірусу. Джерелом коронавірусної інфекції, як правило, є хвора людина. При цьому, період контагіозності невизначено довгий. Джерелом коронавірусу можливо можуть бути також деякі тварини (мавпи, птахи, змії та інші). Джерелом нового типу збудника (2019-nCoV) малоймовірно вказуються кажани. При цьому, тепер немає даних про те, що домашні тварини (такі, як щури, собаки чи коти) можуть переносити коронавірус. Збудники можуть передаватися безпосередньо через предмети, дверні ручки, посилки,

© Григор'єва, Н.С, Гуменюк, Л.О, Марчук, І.В., Собчук, Д.С., Шабайкович, В.А.

продукти, якщо не дотримана гігієна рук і правила кулінарної обробки продуктів. Не можна торкатися забрудненими руками та предметами обличчя, носа, рота, очей. Тому руки рекомендується часто та ретельно мити з милом або обробляти дезінфікуючими засобами. Відмічається нова стратегія коронавіруса, при якій немає ні підвищення температури, ні кашлю, ні болю. Зафіксовано випадки безсимптомного розвитку коронавіруса, яке виявляє КТ, тобто вірус діє далі та нищить легені. Що саме спричиняє такий перебіг коронавірусної хвороби невідомо. Генетики пояснюють це можливою мутацією коронавірпусу, тобто це для них поки що теж невідомо. До того, розповсюдження коронавірусу почалось раніше до офіційного його оголошення.

Вірус передається в основному повітряно-крапельним, повітряно-пиловим і контактним способом і можливо ще якимсь іншим. В сухому стані вірус не передається. У зв'язку з багатьма невідомими протікання коронавірусної інфекції кількість фейкових і абсурдних новин значно зросла. Зросла також кількість безглуздих заходів і обмежень.

Поки що подолати пандемію коронавіруса можна лише вакцинацією, альтернативи якій немає. Зараз у світі відомо до 50 різновидів вакцин з різними характеристиками. Серед них Pfizer та BioNTech, BNT162b2, Moderna, AstraZeneca, Спутнік V, QazCovid-in, CoronaVac. Їх ефективність коливається в межах 70% - 95%. Мутація коронавірусів приводить до неефективності застосування відомих вакцин. Причини мутації коронавірусу невідомі, припускається, що вони зв'язані з його здатністю пристосовуватись до організму людини та її імунної системи. Такі припущення поки що також передбачувані.

В Австрії, Англії, Данії, Нідерландах, ЮАР та інших країнах появився новий штам коронавірусу COVID-19 більш заразний (на 70%), швидко поширюваний, невразливий до відомих вакцин. Нові штами коронавірусів пов'язані з їх мутацією, зменшити яку можна лише зупинкою пандемії вакцинацією, режимом карантину, особистою гігієною. В США було створено антитіло ADG, яке зв'язується не лише з збудником COVID-19, а з більшістю його родинних видів. Відомий експериментальний препарат REGN-COV-2, котрий успішно лікує коронавірус і яким вилікували Дональда Трампа, Джуліані та інших. Його дія базується на моноклональних антитілах. Появився також препарат Bamianivimab і Baricitinib.

Заходи боротьби з пандемією коронавіруса SARS-CoV-2**,** яка створила цілий ряд різнопланових загроз для навколишнього середовища, оцінка яких є складною та ймовірною. Навіть вже на цьому етапі необхідність подолання пандемії COVID-19 порушила цілий ряд гострих проблем [2]. Такі заходи можна згрупувати безпосередньо для хвороби коронавіруса, функціонування виробництва продукції, соціальних заходів тощо, хоча вони є умовними оскільки відображаються на розвитку навколишнього середовища та потребують відповідного фінансування. Причому на практиці на різних етапах боротьби з поширенням коронавіруса SARS-CoV-2 та проявами пандемії COVID-19 згаданих категорії, заходи можуть бути різними. На початку поширення пандемії COVID-19 на перший план вийшли технічно-організаційні проблеми, пов'язані з переміщенням людських потоків, контролем стану їхнього здоров'я, організацією карантину, роботи медичних закладів у нових умовах, організацією відповідних медичних досліджень тощо. При цьому виняток складають інформаційно-психологічні загрози, які супроводжують всі процеси життєдіяльності.

Проявляються також соціальні та особливо фінансово-економічні проблеми боротьби з коронавірусом. Гострішою стає проблема знаходження додаткового фінансування для протидії поширенню коронавіруса та перерозподілу відповідних фінансових і матеріальних ресурсів між різними об'єктами за рахунок резервних фондів державної та місцевої влади, спонсорської допомоги тощо. Треба буде обов'язково враховувати відомий іноземний досвід недопущення негативного перебігу подій з подоланням технічно-організаційних і інформаційно-психологічних загроз. Саме технічно-організаційна сфера боротьби з поширенням пандемії потребує фінансових ресурсів для тестів для перевірки пацієнтів на наявність коронавірусу.

Велике значення має правильне тестування для успішної боротьби з поширенням коронавірусу та пандемії особливо для медичного персоналу. При цьому, підвищенню захворювання на коронавірус є неправильне тестування населення. Саме належна організація тестування населення набуває особливого значення для успішної боротьби з поширенням

**© Григор'єва, Н.С, Гуменюк, Л.О, Марчук, І.В., Собчук, Д.С., Шабайкович, В.А.**

пандемії коронавіруса. За рівнем тестування населення на інфікування коронавіруса Україна значно відстає від країн Європи. Вона єдина, яка ще не почала вакцинування. Відмічається істотне збільшення кількості тестувань методом ПЛР, яке практикується останнім часом. Розширення тестування населення на наявність коронавірусу є необхідним як з медичних, так і з економічних критеріїв. До того ж всі ці заходи крім потреби відповідного фінансування впливають на перебіг економічних процесів. Економічні витрати від заходів боротьби з пандемією коронавіруса можуть бути більшими за негативні економічні наслідки самої пандемії. При цьому ситуація знаходиться між необхідністю стримувати пандемію та при цьому не зруйнувати все технічне, економічне та соціальне життя в країні. Тепер повстала необхідність розробки стратегічно орієнтованого плану в економіці, заходи якого включатимуть не тільки суто економічні, фінансові, але і соціальні, гуманітарні, науково-технологічні тощо.

Таким чином, розглядаючи ситуацію у світі, можна відмітити складну взаємопов'язану систему: пандемія коронавірусу, що складається з самої хвороби коронавірусу, технології лікування, матеріально-лікувальної бази, наявних ліків, спеціалістів, науково-дослідної роботи. Всі складові тісно пов'язані між собою, а особливо функціонуванням МОЗ, фінансуванням тощо. Особливо це стосується реорганізації МОЗ.

Велике значення при пандемії має також виробництво, як засіб життя. Приймались неправильні рішення, які в основному зводились до його закриття. Якщо буде розроблена та впроваджена повітряна дезінфекція приміщень, то всі виробничі приміщення, як і інші, можуть бути дезінфіковані при умові їх ущільнення. Але тут потрібні будуть інноваційні розробки і додаткове оснащення з обладнанням тощо.

Виробництво - це процес створення матеріальних і суспільних благ, необхідних для існування та розвитку. Така лінія (рис. 2) працює без робітників, але з наладчиками, яких потрібно набагато менше. Процес виробництва за своєю структурою складається з таких частин: власне виробництво, основне виробництво, виробнича інфраструктура, соціальна інфраструктура, розподіл, обмін, споживання. Таким чином, ця система включає людський потенціал, продукцію, технологію виготовлення, матеріально-технічну базу тощо. Як виробництво реагує на коронавірусну пандемію? Найпростіше – скороченням чи взагалі закриття виробництва та при цьому виданням зарплати непрацюючому персоналу, тобто за ніщо, що приводить до економічного колапсу, ліквідації сотень тисяч робочих місць та значного погіршення рівня життя населення. Систему творять виробничі відносини, суть виробництва, різні чинники, засоби і способи виробництва, виробничий цикл, підготовка виробництва та виготовлення нових чи пристосованих конструкцій. Це досить складна система.

Рис.2. Роботизована лінія виробництва автомобілів

Виробництво продукції при коронавірусі в першу чергу опирається на його повній підготовленості до функціонування, адаптації. Не кожну продукцію можна виготовляти в таких умовах і тому зосереджуються на її структурі, властивостях, особливо взаємодією з

навколишнім середовищем. Однозначно, технологія одержання продукції має бути антикоронавірусною, як з точки зору відповідності матеріально-технічної бази, організації виробництва і особливо керівного та робочого персоналу. Всі виробничі приміщення повинні бути ізольованими, а повітря та обладнання провентильоване та обов'язково продезинфінковане, додатково робітники постачені засобами індивідуального та колективного захисту, як це роблять зарубіжні фірми.

Наприклад, фірма Boeing зменшила виробництво та скоротила на 10 % персонал у зв'язку з коронавірусом [3]. Компанія зменшила виробництво лайнерів 787 удвічі - до семи літаків на місяць - до 2022 року і відновить виробництво літаків 737 MAX у невеликому обсязі в поточному році, а до 2021 року збільшить його до 31 літаків за місяць. Європейський аерокосмічний концерн Airbus SE на початку квітня також прийняв рішення про скорочення виробництва. Компанія повідомила, що зменшить випуск літаків на третину у зв'язку з пандемією коронавіруса. Boeing планувала виробляти приблизно в два рази більше лайнерів 737 MAX. Також компанія скорочує обсяг виробництва літаків Boeing 777. Раніше в компанії працювало 161 тис. людей. Пандемія коронавіруса завдала бізнесу важкий удар, позначаючись на попиті з боку авіакомпаній, безперервності виробництва, а також стабільності ланцюжка поставок повідомив головний виконавчий директор Boeing Девід Келхун у листі співробітникам.

Великі автомобільні компанії також призупинили виробництво в Європі через пандемію [4]. Також про припинення роботи на території Іспанії та Франції повідомили у прес-службі одного з найбільших авіабудівельних заводів світу. Зупинка виробництва Volkswagen триватиме два тижні Facebook/volkswagen У Європі через оголошення пандемії у зв'язку з коронавірусом виробництво припинили такі великі автоконцерни як Volkswagen, Fiat, Renault і PSA Group. Про це повідомляє_видання Meduza. Всього 35 підприємств автомобільного виробництва повідомили про вимушене припинення роботи через пандемію, що було неправильно. Крім цього, про плани призупинення виробництва в Іспанії та Франції повідомляють у прес-службі авіакомпанії Airbus та заміни іншою продукцією, потрібною при пандемії, наприклад медичною.

Значним поступом була розробка маски, котра діагностує зараженням коронавірусом за допомогою спеціальних чуйииків, які відслідковують основні параметри здоров'я людини [5]. Реєструється температура, насичення крові киснем, артеріальний тиск і частота серцевих скорочень, які є основними при первинному визначенні коронавіруса. Чуйники знаходяться в постійному зіткненні зі шкірою людини, усунувши контакт з хворим і забезпечивши віддалений контроль і передачу даних в реальному часі на смартфон.

Була також розроблена цікава антибактеріальна маска з графену [6]. Фактично це інтегрована система моніторингу, в якій чутливі чуйники, перебувають в постійному контакті зі шкірою людини, реєструють показники, що є основними при первинному визначенні коронавіруса COVID-19. Вказується, що маски впоралися з ліквідацією двох видів коронавірусів, причому, для створення масок вчені користувалися власним, спрощеним методом отримання графену з використанням лазера. Експеримент показав, що 99,7% вірусу SARS-CoV-2 було знищено після 30 секундного впливу короткохвильового ультрафіолетового випромінювання з довжиною хвилі 222 нм і щільністю теплового потоку 0,1 мВт/см$^2$.

Американські вчені розробили багаторазову маску з підігрівом [7], яка знищує віруси. В маску вбудована мідна сітка, котра підігрівається. При диханні повітря проходить через сітку, яка вбиває вірусні частинки високою температурою. Інноваційний гігієнічний пристрій допоможе медикам, які постійно контактують з хворими на коронавірус, а також стане в нагоді людям у випадках неможливості дотримування соціальної дистанції, наприклад, в транспорті в годину пік тощо. Концепція роботи маски відрізняється від інших тим, що не стримує проходження вірусу через маску, а уповільнює його рух і знищує.

Ряд підприємств замість закриття також змінюють продукцію на потрібну для боротьби з коронавірусом [8]. Так, автомобільні концерни почали випускати медичні апарати ШВЛ, а лікеро-горілчані заводи, текстильні фабрики - антисептики і захисні маски. У зв'язку з пандемією коронавіруса багато світових компаній перенаправили частину свого виробництва на виготовлення життєво важливих засобів захисту, медичного обладнання та оснащення. Американські компанії Old Fourth Distillery та Moonrise Distillery, що спеціалізувалися на виробництві спиртних напоїв, почала виробляти антисептики для рук. Група Kering**,** один з

лідерів світового ринку товарів класу люкс, оголосила, що готова запустити виробництво медичних масок на французьких заводах модних будинків Balenciaga I Yves Saint Laurent.

У Чехії винайшли фільтри [9] що потенційно здатні знищувати COVID-19 для вентиляційних систем, які допоможуть знезаражувати середовище у приміщеннях. Цей пристрій допоможе у боротьбі з коронавірусом, а людям дозволить нарешті зняти маски у приміщеннях. Над прототипом кілька місяців працювали інженери з одного із празьких університетів.

Боротьба медицини з пандемією коронавіруса є недостатньою. Немає кваліфікованого медичного персоналу, обладнання, оснащення, необхідних ліків, засобів захисту тощо. У багатьох селах і містечках України стан сільської медицини катастрофічний. Боротьба з коронавірусом в сільській місцевості проводиться ще гірше, що пов'язано з об'єктивними і суб'єктивними причинами, хоча там проживає біля 31,1% населення країни, де є проблеми з доступом до медичної допомоги і саме там раніше селянам надавалась перша медична допомога. Найгірше, що стан медичної інфраструктури значно погіршився після «реформування» медицини екс-міністром МОЗ **У.Супрун** разом з лобістами з Ради, Уряду та іншими «затоками», які не розуміючи положення, помилково вважали, що економічно невигідно утримувати фельдшерсько-акушерські пункти на селі, в яких було зосереджено хоча і старе обладнання, оснащення, штат лікарів і середнього медичного персоналу, виконувались прості аналізи та надавались медичні послуги тощо. Цікаве «об'єднання» медичних закладів згідно реформи: наприклад, два заклади об'єднуються в один, але фінансування залишається тільки для одного. Є приклади, коли на функціонування одного закладу фінансування проводилось в складчину. Хоча всі знають про недоліки цього, «реформування» ніхто не збирається його відміняти. Цікаво, звідкіля та як підбираються такі бездарні керівники. На жаль порівняння системи з світовою не корисне для України і то по всіх напрямках. Викликає велике здивування, коли горе-керівники призначають додаткові спецпоїзди буцімто для вивозу туристів з червоних зон, тобто проводиться фактичне розповсюдження пандемії коронавірусу по всій країні, замість знищення його на місцях.

Після цього взялись за приватизацію чи вірніше «прихватизацію» медичної інфраструктури та особливо платних медичних послуг, тобто зайнялись бізнесом в медицині. При цьому значно зменшилась кількість медичних пунктів, медичного персоналу, медичних послуг, значно збільшились кошти на ліки в аптеках, до яких ще треба було добратись по поганих дорогах. Нанесена шкода очевидна. Держава навіть не виконала основного – забезпечення фінансової допомоги сільській медицині в боротьбі з коронавірусом. Відомі факти, коли виділені кошти на боротьбу з коронавірусом перекидались на ремонт доріг, інші цілі.

Почалася суцільна приватизація з її негативними наслідками. Наприклад, пройти КТ завдання не з легких: треба чекати від 3 до 10 днів, черги, збільшилась його вартість до 3 - 5 тис. грн, МРТ – до 5000 тис. і т.п. На тестування, обстеження та лікування тратяться шалені гроші, хоча все це повинно робитися безкоштовно і в першу чергу на селі по місцю проживання пацієнтів. На селах і надалі медичні пункти розташовані далеко один від одного, немає потрібних лабораторій, обладнання, оснащення, кваліфікованого медичного персоналу, а медичні послуги стали платними. Особливо подорожчали ліки, найдешевший препарат, що на 100% відшкодовує держава, коштує 5,22 грн, *найдорожчий* – 863,43 грн, хоча це не все: меробоцид коштує 100-200 тис. грн. Є і дорожчі препарати. Все це відштовхує особливо бідне сільське населення і не тільки від лікування. Родинна пара, яка лікувалась від коронавіруса вдома, заплатила 40 тис. грн, хоча заяви Міністра МОЗ Степанова М.В. про безкоштовні ліки і лікування хворих вдома залишаються балаканиною. Безплатне в медицині хіба що тільки співчуття і то не завжди.

Не важко по селах відновити кращу інфраструктуру медичного обслуговування, але ніхто цього не робить. Причина – відсутність фінансування, а також чомусь зацікавленості. Уряд мав би представити план збереження районних сільських лікарень та надання медичних послуг, наприклад, функції денного стаціонару. Прості аналізи можна робити в сільських лабораторіях, які можуть бути також мобільними, там же організувати правильну роботу сімейних лікарів, тестування тощо.

Зрозуміло, що до появи ефективних ліків, препаратів, способів лікування, вакцинація від коронавірусної хвороби буде малоефективною. На жаль, дієвим способом профілактики і реагування на поширення коронавірусної хвороби залишаються тільки обмежувальні протипандемічні заходи. Заходами боротьби з коронавірусом (рис. 3), є сама коронавірусна

хвороба, виробництво продукції та соціальна сфера обслуговування. При цьому головним виступає медичний персонал з його мізерними зарплатами, які безумовно вимагають значного підвищення, на що держава не може собі дозволити з-за поганого стану економіки і її подальшого занепаду. Тут можна також віднести низьку кваліфікацію (*яка плата, така праця*!). Практика минулого показала, що з-за об'єктивних і суб'єктивних причин часто відчувається дефіцит кадрів, тобто завжди повинен бути кадровий резерв, якого нема. Дуже багато медпрацівників по цих причинах виїхали за кордон, де успішно працюють на іншу країну.

Необхідним є профілактика та обов'язкове всеохоплююче тестування на коронавірус, засоби захисту, алгоритм лікування тощо. Без необхідних сучасних ліків і супутніх матеріалів ніякого покращення не передбачається. Надзвичайно важливим виступають наукові дослідження процесів, що вимагають високої кваліфікації дослідників і організації наукових лабораторій, центрів тощо, які відкриваються в передових країнах з високим рівнем економіки. Але головним вважається якість урядування та управління, яка є явно недостатньою, та кваліфікованість.

Замість хімічної обробки, воду чи повітря опромінюють ультрафіолетовим світлом, яке є ефективним: віруси, бактерії та інші мікроорганізми знищуються ультрафіолетом за лічені секунди. Адже таке випромінювання пошкоджує геном мікроорганізмів, через що збудники хво-роб не можуть далі розмножуватися.

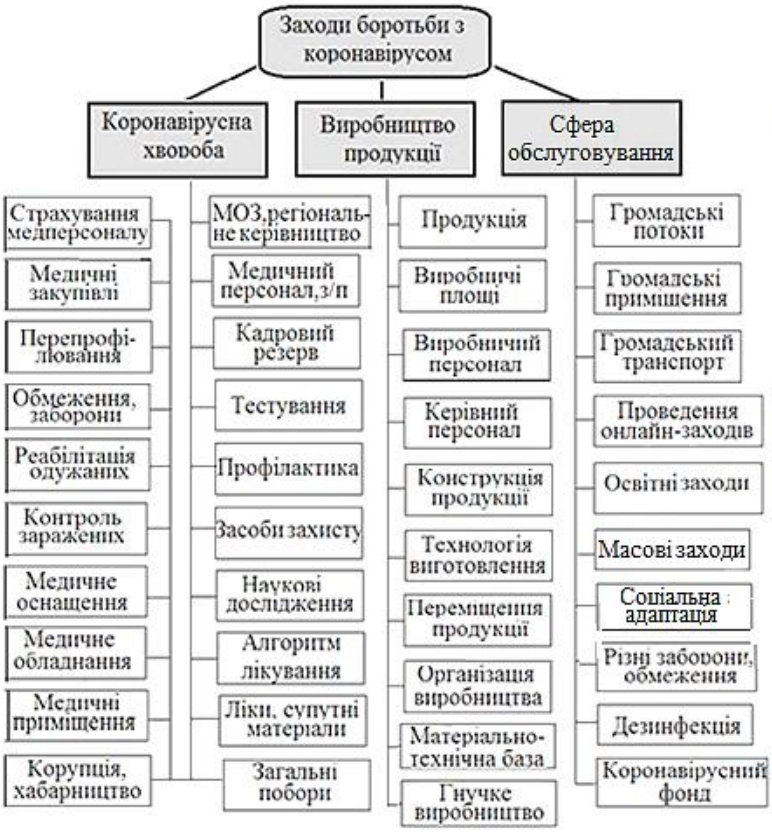



Рис. 3. Заходи боротьби з пандемією коронавірусу

.

Під час пандемії коронавірусу, який зокрема передається через аерозольні частинки вологи у повітрі, до дезінфекції за допомогою ультрафіолету прикута особлива увага. Використовують нові ультрафіолетові лампи [10], які створюють дезінфекційну варству під стелею, де циркулює та очищується повітря. До цього при використанні використанні світла ультрафіолетових ламп у приміщеннях доводилося усіляко уникати його потрапляння на людину, оскільки воно є шкідливим для здоров'я.

Велике значення мають не тільки засоби індивідуального захисту: костюми безпеки, ізоляційні халати, маски, захисні окуляри, щитки, рукавички, респіратори тощо. Особливо корисною є ультрафіолетова лампа Care 222 [11], яка вбиває коронавірус в приміщенні. Про це повідомляє Kyodo News. Її можна використовувати для дезінфекції приміщень, де постійно

знаходяться люди, наприклад, в автобусах, поїздах, ліфтах, офісах. Нова лампа випромінює ультрафіолетові промені з довжиною хвилі 222 нм замість звичайних 254. Це робить їх смертельними для коронавіруса, але нешкідливими для людини. Ефективність 222-нанометрових УФ-променів у підтвердили також наукові дослідження.

Наступну групу заходів становить стан медичних приміщень, обладнання, оснащення та наявність необхідної ефективної апаратури. Важливими є обґрунтовані обмеження, заборони, карантинні заходи, штрафи і фінансова підтримка в першу чергу як зі сторони держави, так і різних фондів, спонсорів тощо. Декілька слів про прості одно- чи багатоварстні маски. Порівнюючи розміри коронавіруса (80-220 нм) і мкм тканини та прохідне січення таких масок, легко прийти до висновку про їх малу ефективність, особливо при кашлі, чиханні тощо, коли коронавірус ще не зосереджений на каплях.

Дезінфекція має бути не тільки повітря, зводитися до простого протирання поверхонь, як широко показують, але і використання дезінсекції та дератизації приміщень, обладнання,транспорту, що знищують віруси. Тут треба згадати низьку свідомість пацієнтів, які борються з пандемією, але в більшості недостатньо. При розробці заходів боротьби з коронавірусом у керівництва відсутня фаховість захисту та особливо його виконання.

Значну шкоду лікуванню взагалі, а коронавіруса зокрема, завдають бізнес, корупція, хабарництво, а особливо загальні побори, які значно поширились на ґрунті надзвичайно низьких зарплат і поганої організації робіт. Успішне вирішення будь-яких питань супроводжуються хабарами, а «безкоштовна» медицина є фікцією. Хворі вже давно ліки закуповують в аптеках самостійно, але навіть їх використання (бинти, уколи, крапельниці і т.п.) оплачується пацієнтами. Всі процедури платні. За відгуками хворих тепер один день в лікарні в залежності від важкості хвороби обходиться 10-30 тис. грн і це тільки мінімум. У лікарнях України справжня катастрофа: не вистачає місць хворих на Covid-19, пацієнти лежаь у коридорах, їдальнях, вільних місць немає, на кисень не вистачає кисневих балонів, всюди черги, реанімація постійно переповнена, смерті майже щодня. Змінити таке становище в медицині можна як за рахунок підвищення зарплат, так і адміністративного та кримінального переслідування, як це, наприклад, було зроблено в Польщі та інших країнах. При цьому треба обов'язково враховувати результативність лікування. Приємним виключенням з цього є приклад функціонування військових госпіталів, в яких частина зловживань значно менша.

Особливе значення має вакцинація для захисту від коронавірусної інфекції COVID-19 в системі охорони здоров'я**.** Необхідно вакцинувати понад 70% населення планети, щоб пандемія коронавірусу припинилась. Відомі вакцини BNT162b2 створені у співпраці фармкомпаній Pfizer (США) і BioNTech (Німеччина) з ефективністю 95 %. Інша вакцина Moderna (США) створена у співпраці фармкомпаній Pfizer і BioNTech має ефективність 94,5 %. Вакцина Moderna (США) mRNA-1273 має також високу ефективність 94,5 %. Зараз відомо більше 50-ти таких препаратів. До квітня 2021 року було заплановано виготовити 145 млн доз цієї вакцини. Двокомпонентна двовекторна вакцина Супутник V виготовлена Росії. Заявлена ефективність за офіційними даними - 92 %¨ Світові ЗМІ наголошують на сумнівах щодо безпеки цього препарату з огляду на інформацію, що Росія пропустила важливі етапи розробки і не навела наукових даних про випробування вакцини, але це питання більше політичне. Масова вакцинація в Росії почалась 5 грудня 2020 року, вартість вакцини - близько $20, для населення країни препарат є безкоштовним. Особливу увагу до себе привернула оксфордська вакцина ChAdOx1 під кодовою назвою AZD1222 фірми Vaccitech, розроблена британсько-шведським фармаконцерном AstraZeneca у співпраці з Оксфордським університетом. Оксфордську вакцину ChAdOx1 вважають одним із фаворитів у боротьбі з пандемією COVID-19. Низка урядів уже попередньо замовила її. Насправді розробкою вакцини займається ще більша кількість компаній. Наприклад, шведсько-британський фармацевтичний велетень AstraZeneca, або Johnson & Johnson. Тим часом у Китаї розробляють одразу кілька вакцин проти нового коронавірусу. Компанія Sinovac Biotech розробила вакцину CoronaVac. Більшість вакцин викликають незначні побічні ефекти. По суті, це імунна та запальна реакції організму на вакцину.

Відома нова заявлена ефективна вакцина, яка зупиняє цитокіновий шторм на основі моноклональних антитіл REGN-CoV2 Bamlanimab і протизапальний Baricitinib, які вже дозволені у ЕС і США. Але у нових штамах вірусів поки що невідомо чи вказані вакцини будуть ефективними, швидше всього ні.

**© Григор'єва, Н.С, Гуменюк, Л.О, Марчук, І.В., Собчук, Д.С., Шабайкович, В.А.**

До недоліків вакцинації можна віднести наявність великої кількості різноманітних вакцин з різними характеристиками, хоча відомо, що в таких випадках вибираються найкращі, які і рекомендуються до виготовлення та для вакцинації. Різноманітність вакцин відкрила дорогу до їх націоналізації та політизації, що недопустимо. Тут також можна відмітити шахрайство та корупцію як при їх виготовленні, так і розприділені. Тільки на Україні Уряд може назначити дату вакцинації вакциною, якої ще взагалі нема в державі. Опускаючи різні ліки, на яких наживається аптечна мафія, оказується навіть продаються фіктивні довідки про результати тестування, потрібні для видуманих цілей (поїздки, прийом на роботу тощо). Їх поява обґрунтована меншою ціною в рази, ніж державною та бажання збагачення.

Масштабну шахрайську схему розробили у двох київських столичних медичних університетах: студентам-двієчникам продавали сертифікати професійної компетентності системи «Крок» на продовження навчання (газета Експрес №7 [10554] 18-25.02.2021). За «послугу» студенти платили 3 тис. $, іноземці - 5 тис.$. На цьому шахраї заробляли мільйони доларів. Страшно навіть подумати, якими лікарями вони будуть в майбутньому?

З метою покращення боротьби з коронавірусом почали застосовуватись локдауни, які практично мало що дають і в яких немає ні краплі логіки, ні грама здорового глузду. Якою хворобою заразилось керівництво, яке накладає ряд нелогічних обмежень типу заборони працювати магазинам з непродовольчими товарами, в тому числі заборона купівлі ні шкарпеток, ні батарейок, поїздок на курорти (наприклад курорт Буковель, де відпочивав Президент і море бізнесменів?). Навколо вакцини проти коронавірусу COVID-19 відчувається також якась хімія: незрозуміле втручання держави у вибір постачальника препарату, особисто Прем'єр-міністра, хоча це функція виключена така зацікавленість, також в одній зі схем збагачення.

Непрофесійне та випадкове фінансування боротьби з коронавірусом підтверджує використання фонду боротьби з ним 66 млрд грн [12], який Кабмін заснував в квітні 2020 р. в розпал жорсткого карантину. Цей фонд ніякого відношення до боротьби з коронавірусом не мав, гроші розтринькали на інші цілі. Для порівняння: МО в 2020 р. виділено 117,6 млрд грн, МОЗ - 115,7 млрд грн, МВС - 93,4 млрд грн, Міносвіти - 43,2 млрд грн. Понад 14 млрд грн з фонду спрямовані МОЗ, Мінекономіки і Мінсоцполітики, які отримали 6,9 млрд грн і 3,4 млрд грн відповідно. Найбільш резонансним стало виділення 54,1% коштів з коронавірусного фонду на дороги, що продовжується і надалі. Помилково вважають, що достатнє забезпечення пріоритетних напрямків охорони здоров'я та соціального захисту громадян дозволило спрямувати кошти фонду на ремонт і утримання автодоріг. Крім "коронавірусних" 35 млрд грн в поточному році на дорожнє господарство направлено 69 млрд грн з державного дорожнього фонду та 4,4 млрд грн кредитів від міжнародних фінансових організацій. Крім цього, Укравтодор отримав державну гарантію на суму 19,3 млрд грн для забезпечення запозичень на відновлення автодоріг. При цьому, гроші фонду не освоєні, що говорить про не ефективне планування різних робіт. Поки Укравтодор і МВС проїдають Коронавірусний фонд, МОЗ само не дуже активно використовує ці кошти. З виділених на медицину 14,3 млрд грн станом на 22.09.2020 р. освоїли лише 519 млн (3,6%). Гроші витрачали на забезпечення лабораторій МОЗ та закупівлю засобів індивідуального захисту. Але на 24.09.2020 р. обіцяні виплати надбавок лікарям не розпочато.

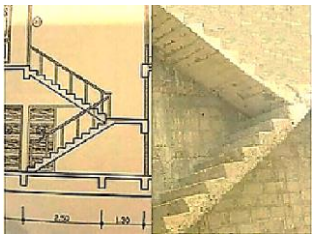


Рис. 4. Результат проектування сходів інженером-будівельником після його дистанційного навчання

На це з фонду боротьби з COVID-19 виділили 5,9 млрд грн. Тепер Україна від ЄС отримала перший транш у 600 млн євро з програми допомоги на 1,2 млрд євро. МВФ відмовив Україні в наданні кредиту на суму $2,2 млрд з-за відсутності прогресу в реформах.

В умовах пандемії правильним і необхідним є проведення онлайн-заходів для людей, які мають прямий особистий контакт між собою при вирішенні питань, що повстають, безмасових заходів і різних заборон, обмежень тощо. Онлайн-заходи мають безумовно велике значення, але при відповідному обґрунтованому застосуванні, наприклад, проведення конференцій, зустрічей, нарад тощо. Зовсім непридатне використання онлайн-заходів при навчанні, що приведе до зниження його якості, яка у нас і так невисока. Це можна коротко проілюструвати рис. 4 при проектуванні сходів інженером-будівельником після його дистанційного навчання [13], які

© Григор'єва, Н.С, Гуменюк, Л.О, Марчук, І.В., Собчук, Д.С., Шабайкович, В.А.

виглядають ніби правильними, але мають суттєву помилку. Що б не придумувати, але для користі та ефективності, навчання має бути традиційним, очним, а не заочним чи дистанційним.

Великою помилкою було закриття транспортних потоків, громадського транспорту, сфери обслуговування тощо, що продовжується і тепер. Це як би перекрити судини в людському організмі, хоча природа підказує, що їх треба тільки чистити чи міняти.

Коронавірус вплинув не тільки на навколишнє середовище, але і на всі сфери життя через суспільно-політичну сферу, виробництво, сферу послуг тощо. Особливо постраждала економіка: змінилася структура попиту та пропозицій, глобалізація стала регіоналізацією та локальним протекціонізмом, піднялась ціна активів, відновилось самозабезпечення необхідними товарами, енергоресурсами тощо. Знизилась ділова активність, впав ВВП, скоротились витрати, споживання, персонал організацій, зріс ІТ-сектор, кількість зайнятих у ньому і частка у ВВП підвищилася ефективність бізнесу тощо. Прогнозується зростання ВВП України у 2021 році на 4,1% при інфляції 6,9.

З початку пандемії падіння ВВП склало 6-8%, а на кінець року прогнозується ще 3,7%. Український ВВП можливо впаде більше ніж світовий на 4,2 %. ВВП України через пандемію COVID-19 скоротиться на 7% у 2020 році внаслідок впливу на економіку зовнішніх та внутрішніх шоків. Песимістичний прогноз передбачає триваліші карантинні заходи в Україні та сильніші зовнішні та внутрішні шоки, за рахунок чого економіка зменшиться навіть на 11,2%». За оцінкою МВФ, українська економіка зменшиться за підсумками 2020 року на 8,2%. Спочатку в міністерстві економіки говорили про падіння ВВП на 3,9%. Проте в останньому прогнозі Уряд збільшив цей показник до 4,8%.

Правда, жоден світовий аналітичний центр чи інвестбанк не здатний швидко оцінити масштаб трансформацій, оскільки це залежить від багатьох чинників, що динамічно змінюються. При цьому біоінженерія стане новим хайповим сектором світової економіки, зміниться її структура та логістики, будуть змінені ключові локації виробництв, збільшиться розрив між багатими і бідними країнами. Багаті країни обмежать бідних в доступі до технологій, зміниться система охорони здоров'я. Її частка у ВВП має зрости. Алгоритми медичних сервісів також зміняться, збільшуючи на них витрати. Дедалі більше уваги приділятиметься профілактиці пандемії та превентивним заходам.

На коронавірусну хворобу може захворіти від 40% до 60% населення планети. При цьому багато хто у легкій формі, що не створює їм дискомфорту, найімовірніше буде кілька хвиль протягом року. Вже сьогодні є більше 50 різновидів вірусу, який мутує постійно, а це як кажуть, підтверджує штучність його походження (біологічна зброя ?) і також не гарантує, що людина, перехворівша на коронавірус, чи отримала щеплення не захворіє іншим його штамом. З початку вакцинації проти COVID-19 в світі вже зробили близько 312 млн щеплень в 116 країнах. В середньому вводять по 8,08 млн доз щодня. Ефективність невисока, що свідчить про якісь недоробки ?.

В майбутньому, коли будуть знайдені ліки від коронавірусу та паралельно від багатьох інших захворювань, стануть нормою віртуальні сервіси та дистанційна робота, наради, перемовини тощо, знизиться частка людської праці в логістиці, комунікаціях, сервісі, в тому числі державному. Криза триватиме ще довго та залежатиме від багатьох причин. Як показує структура коронавіруса, можна припустити, що успішний напрямок майбутніх ліків повинен бути направлений на знищення функціонування білкових шипів, як мостика від віріона до поверхні клітин людини. Другою підказкою є знищення коронавіруса шлунковим соком в шлунку, які чомусь не розглядається. Підказкою також може бути особливості утворення зовнішньої форми вібріона (структури) тощо.

В кінці року Держаудит служба розпочне державний фінансовий аудит виконання бюджетних програм боротьби з хворобою COVID-19 та її наслідками, спричиненою коронавірусом SARS-CoV-2 за 10 місяців 2020 р. Цікаво чи буде опубліковано, скільки грошей було розкрадено і саме ким?

Велика смертність від коронавірусу, більше 2,5 млн. людей, викликає багато питань до керівництва: причини непідготовленості до пандемії, куди поділись мільярди від податків, чому так повільно проводиться вакцинація, чому не всім доступна вакцинація, чому закуповується менш ефективна та більш небезпечна вакцина та багато інших. Сім країн світу відмовились від щеплення вакциною AstraZeneca (Естонії, Латвії, Австрії, Данії, Литві та Люксембурзі) по причині побічних ефектів, в основному тромбозу. Тепер Україна схвалила китайську вакцину

Sinovac від коронавірусу, що по розповсюдженню не є кращим варіантом. Але саме більше зло, коли боротьба з пандемією перетворилась в нову бізнес-стратегію, навіть індустрію? Відомо, що в таку боротьбу світ вже витратив 16 трлн дол., а це біля 20% глобального ВВП, розміри економіки таких країн як чотири Німеччини, 11 Росій, або в п'ять разів більше світового нафтогазового бізнесу. Безліч компаній та окремих любителів швидкої наживи включились за здобуття цих фантастичних ресурсів. Значно збагатилась фармацевтика та виробники санітарно-гігієнічних засобів, масок, медичних тестів тощо. Суми медичних закупівель повсюди значно збільшились.

**Висновки.**

Неочікувана поява пандемії коронавіруса показала повну непідготовленість МОЗ і його підрозділів, поліклінік і лікарень до боротьби з нею, а також виробництвом і соціальною сферою. Недостатній медичний персонал, обладнання та оснащення, відсутність методики лікування та багато іншого потрібного. Замість боротьби з пандемією продовжилось впровадження невдалої медичної реформи, почалось закриття чи скорочення виробництва, звільнення персоналу чи виплати компенсацій без виходу на роботу, закриття громадських потоків, надумані необґрунтовані заборони і обмеження тощо. Проявилась повна відсутність науково-дослідних результатів як по коронавірусу, так і пандемії. В результаті низької кваліфікації все робилося навпаки, що привело до розширення пандемії.

Для боротьби з пандемією коронавіруса необхідний фаховий обґрунтований план забезпечення як результатами досліджень, так і потрібним медичним персоналом, обладнанням і оснащенням, жорстким контролем його виконання, що зараз відсутнє. Безумовно на першому місці має бути кваліфікація розробників і виконуючого персоналу. При цьому витрати обов'язково повинні бути сумірними з результатами від їх застосування.

**Інформаційні джерела**

1. Анча Баранова. Коронавірус Інструкція з виживання. Вид-во Наш формат. - 2020. -155 с.

2. Кулицький С. Проблеми розвитку економіки України, обумовлені пандемією коронавірусу COVID-19 у світі, і пошук шляхів їх розв'язання (Початок, закінчення див. у № 9) [Електронний ресурс] / С. Кулицький // Україна: події, факти, коментарі. – 2020. – № 8. – С. 53–63. – Режим доступу: http://nbuviap.gov.ua/images/ukraine/2020/ukr8.pdf.

3. Boeing зменшить виробництво і скоротить персонал у зв'язку з коронавірусом. [Електрон ний ресурс]. – 2020. Режим доступу до ресурсу: https://ua.interfax.com.ua/news/ economic /658882.htm.

4. Великі автомобільні компанії призупинили виробництво в Європі через Коронавірус. [Електронний ресурс] -2020. - Режим доступу до ресурсу: https://dt.ua/WORLD/veliki-avtomobilni-kompaniyi-prizupinili-virobnictvo-v-yevropi-herez-pandemiyu-341780_.html.

5. Маска, що діагностує зараження коронавірусом. [Електронний ресурс] -2020. - Режим доступу до ресурсу: http://www.moyby.com/news/408738/.

6. Антибактеріальна маска з графену. [Електронний ресурс]: – 2020. Режим доступу до ресурсу: https://cikavosti.com/vcheni-rozrobili-antibakterialnu-masku-z-grafena/.

7. Багаторазова маска з підігрівом. [Електронний ресурс]: – 2020. Режим доступу до ресурсу: https://socportal.info/ru/news/uchenye-sozdali-mnogorazovuiu-masku-s-podogrevom-otoraya-unichtozhaet-virusy/.

8. Світові компанії змінили профіль з-за коронавіруса. [Електронний ресурс] -2020. - Режим доступу до ресурсу: [https://ua.112.ua/golovni-novyni/antyseptyk-zamist-alkoholiu-yak-svitovi-kompanii-zminyly-profil-z-za-koronavirusa-531615.html].

9. Унікальні фільтри для вентиляційних систем. [Електронний ресурс]. – 2020. Режим доступу до ресурсу:https://www.you tube.com/watch?v=aiG8MUlQcrY&feature=emb_rel_end

10. Безпечне ультрафіолетове випромінювання знищує SARS-Cov-2. [Електронний ресурс] - 2020. - Режим доступу до ресурсу: https://mister-blister.com/issledovanie-pokazyvaet-chto-bezopasnoe-ultrafioletovoe-izluchenie-effektivno-ubivaet-SARS-CoV-2/.

11. Ультрафіолетова лампа Care 222. [Електронний ресурс]. – 2020. Режим доступу до ресурсу: https://medprofi.com.ua/baktericidnye-recirkulyatory.

12. Будівництво під час чуми. На що пішли гроші з фонду боротьби з коронавірусом. [Електронний ресурс], -2020 - Режим доступу до ресурсу: https://focus.ua/economics/464333-bolshaja-strojka-fond-koronavirus-ukraina.

**© Григор'єва, Н.С, Гуменюк, Л.О, Марчук, І.В., Собчук, Д.С., Шабайкович, В.А.**

13. Сходи, запроектовані інженером-будівельником після його дистанційного навчання. [Електронний ресурс], -2020 - Режим доступу до ресурсу: https://m.facebook.com/7794443221-18682/photos/a.779453625451085%20/3465427606853660/?type=3&refid=52&__tn__=EH-R

## ВЛИЯНИЕ ПАНДЕМИИ КОРОНАВИРУСА НА ПРОИЗВОДСТВО И МЕДИЦИНСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ

**Григорьева Н.С., Гуменюк Л.О., Марчук И.В., Собчук, Д.С., Шабайкович В.**
Луцький національний технічний університет

*Рассмотрены меры борьбы с пандемией коронавируса при лечении заболевания коронавирусом, с организацией нормального функционирования производства и адаптации социальной сферы обслуживания. Первое направление - основное, связанное с мерами подготовки медицинского персонала, лекарств, оборудования, оснастки, специалистов-врачей, тестирования, вакцинации. Это достигается исключительно при комплексном анализе и синтезе уровня медицины, конструкции и технологии изделий производства, его организации, внутренней и внешней среды. Обеспечение нормального функционирования производства достигается путем его реорганизации, дезинфекции производственных мощностей, использование автоматического оборудования и оснастки, защита производственного персонала. Изменения в социальной сфере обслуживания включают ее адаптацию к пандемии коронавируса, реорганизации транспортных потоков, услуг, запреты, ограничения и приспособленность к окружающей среде. Обязательный учет причин пандемии коронавируса.*

**Ключевые слова:** *коронавирус, пандемия, мероприятия, запреты, ограничения.*

**N. Grigoryeva, DSc., PhD., Eng., prof., L. Humeniuk, Ph.D., I. Marchuk, Ph.D., D. Sobchuk, Ph.D.Eng, W. Shabaykovich, DSc., prof.Eng.**

## THE IMPACT OF THE CORONAVIRUS PANDEMIC ON PRODUCTION AND MEDICAL SERVICE

*Measures to combat the coronavirus pandemic in the treatment of the corona-virus disease, with the organization of the normal functioning of production and adaptation of the social service sector are considered. The first direction is the main one, connected with measures for the preparation of medical personnel, drugs, equipment, equipment, medical specialists, testing, vaccination. This is achieved exclusively through a comprehensive analysis and synthesis of the level of medicine, design and technology of production products, its organization, internal and external environment. Ensuring the normal functioning of production is achieved by its reorganization, disinfection of production facilities, the use of automatic equipment and tooling, protection of production personnel. Changes in the social service sector include its adaptation to the coronavirus pandemic, reorganization of traffic flows, services, bans, restrictions and adaptability to the environment. Mandatory consideration of the causes of the coronavirus pandemic.*

**Key words**: *coronavirus, pandemic, events, bans, restrictions.*

**© Григор'єва, Н.С, Гуменюк, Л.О, Марчук, І.В., Собчук, Д.С., Шабайкович, В.А.**

УДК 621.9.048
**Денисюк В.Ю.,** *к.т.н.,* **Симонюк В.П.,** *к.т.н.,* **Лапченко Ю.С.,** *к.т.н.,* **Кайдик О.Л.,** *к.т.н.,* **Пташенчук В.В.,** *к.т.н.*
Луцький національний технічний університет

# ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ПРИ УДАРНО-ІМПУЛЬСНОМУ НАВАНТАЖЕННІ ВІБРОБУНКЕРА

*В статті представлені результати досліджень закономірностей циркуляційного вихрового руху робочого середовища та переміщення корпусу вібробункера при його симетричному ударно-імпульсному навантаженні. Встановлено, що ударно-імпульсні навантаження на вібробункер призводять до виникнення повільного циркуляційного руху робочого середовища, який інтенсифікується при несиметричному ударному навантаженні. Представлено результати експериментальних досліджень процесу вібраційної обробки деталей, перевірено відтворюваність експерименту та достовірність отриманих результатів. Здійснено аналіз технологічних можливостей віброобробки в широкому діапазоні частоти та розмаху коливань. Наочно представлено причини проблематичності вибору оптимальних режимів віброобробки та можливі напрямки їх подолання. Здійснено моделювання різних режимів роботи вібраційної установки. Аналіз результатів дав можливість виявити принципи оптимального підбору режимів віброобробки. Встановлено спосіб досягнення режиму роботи вібраційної установки з максимально ефективним використанням механічної енергії коливань.*

***Ключові слова:*** *вібраційна абразивна обробка, вібробункер, циркуляційний рух, електромагніт, абразивний матеріал, ударна хвиля.*

**Постановка проблеми.** Актуальність вібраційних методів обробки деталей пояснюється перевагами цього методу над традиційними фінішними операціями. Віброобробка дозволяє забезпечити механізацію процесу обробки, покращити обробку геометрично-складних зовнішніх і внутрішніх важкодоступних поверхонь деталей, а також обробку крихких і нежорстких деталей без порушення їх геометричної форми та пошкодження поверхонь [1]. Застосування віброобробки в якості фінішної операції дозволяє суттєво знизити собівартість виготовлення деталей і забезпечує отримання мікронерівностей порядку 0,15÷0,25 мкм. У ряді випадків вона може замінити доводку, собівартість якої в 4 – 5 разів вища.

Процес вібраційної обробки полягає в послідовному нанесенні по поверхні оброблюваних деталей великої кількості мікроударів, а також нанесенні великої кількості мікроподряпин на поверхні частинками робочого середовища. Основою процесу є механічне або механо-хімічне знімання дрібних частинок металу та його окислів з оброблюваної поверхні, а також вигладжування мікронерівностей поверхні за рахунок пластичного деформування частинками робочого середовища, які відтворюють в процесі роботи складні рухи [1–3].

Формування поверхневого шару в процесі вібраційної обробки відбувається під дією багаторазових мікроударів частинок робочого середовища, які викликають утворення слідів обробки, зміну геометричних і фізико-механічних параметрів поверхневого шару (шорсткості, мікротвердості, залишкових напружень і структури). Форма і розміри слідів обробки визначаються параметрами робочого середовища, режимами обробки, властивостями оброблюваного матеріалу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Зацікавленість віброабразивними методами обробки деталей пояснюється рядом переваг цього методу при виготовленні деталей з високим класом чистоти поверхні. Це деталі підшипників кочення, інструмент (різці, свердла та фрези після термічної обробки і зварювання), деталі двигунів, верстатів, холодильників та ін. [2]. Важливою перевагою віброобробки є висока стабільність результатів обробки всіх деталей однієї партії, що особливо важливо при обробці високоточних деталей [1, 2].

До фінішних методів відноситься і вібраційна обробка деталей в різноманітних середовищах, яка забезпечує створення необхідної шорсткості і фізико-механічних властивостей поверхні та поверхневих шарів [3].

Вібраційна обробка деталей в абразивному середовищі відбувається з використанням певного обладнання. Віброустановка, як правило, містить джерело рушійної сили (вібратор) і контейнер для завантаження робочої суміші, яка включає оброблювані деталі, наповнювач

© Денисюк В.Ю., Симонюк В.П., Лапченко Ю.С., Кайдик О.Л., Пташенчук В.В.

(абразив), а також, при необхідності, рідинні розчини [4].

До технологічних факторів процесу відносяться: продуктивність при заданій якості, вибір абразивних матеріалів і режимів обробки, необхідність застосування хімічних добавок в робочі розчини або нагрівання їх з метою підвищення ефективності обробки [4].

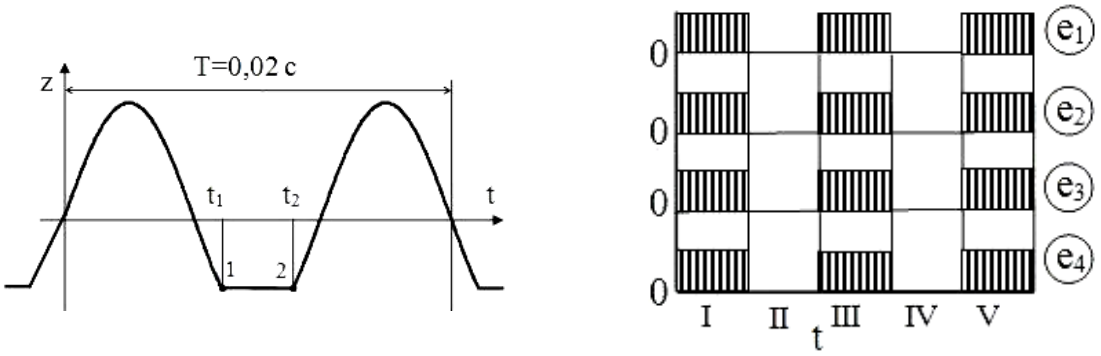
**Мета роботи.** Розроблення комплексу експериментально-теоретичних підходів до дослідження закономірностей повільного циркуляційного руху робочого середовища у вібробункері та визначення впливу параметрів вібробункера на процес ударно-імпульсної обробки.

**Викладення основного матеріалу.** Розроблена нами вібраційна установка (рис. 1) містить робочу камеру, встановлену на з'єднаних з основою опорах, кінці кожної з яких споряджені пружинами, а днище робочої камери споряджене віброзбуджувачами, виконаними у формі електромагнітів. Кількість опор та електромагнітів дорівнює чотирьом. В залежності від послідовності включення електромагнітів формується необхідний циркуляційний рух робочого середовища [8].

Рис. 1. Вібраційна установка

Закономірності руху розглянемо для різних випадків ударного навантаження. Ударні навантаження можуть здійснюватися за симетричною схемою, коли включені всі чотири електромагніти та за асиметричними схемами [5, 6, 7].

При одночасному включенні всіх чотирьох електромагнітів вібробункер буде рухатись в напрямку осі *z*. В першому наближенні будемо вважати рух вібробукера синусоїдальним, відповідним синусоїдальній силі, що створюється електромагнітами. Ударне імпульсне навантаження на вібробункер відбувається при його взаємодії з упорами в точці 1 (рис. 2, а).




а) б)

Рис. 2. Закон переміщення корпуса вібробункера при його симетричному ударно-імпульсному навантаженні (а) та циклограма одночасного включення всіх чотирьох електромагнітів (б)

Частота включення електромагнітів складає 50 Гц. Амплітуда переміщення 2 ... 3 мм. При ході вібробункера вниз він взаємодіє з упорами і зупиняється. При цьому, в робочому середовищі виникають інтенсивні процеси імпульсного характеру (рис. 2, б).

При ударі точки $D_1$, $D_2$ дна вібробункера взаємодіють з упорами і зупиняються (рис. 3). Робоче середовище і дно вібробункера рухаються по інерції. При цьому має місце пружна деформація дна вібробункера і він прогинається. Його точка $D_3$ рухається вниз під дією сил

© Денисюк В.Ю., Симонюк В.П., Лапченко Ю.С., Кайдик О.Л., Пташенчук В.В.

інерції дна та інерції середовища і зупиняється в стані динамічної рівноваги. При цьому гранули і деталі, які утворюють робоче середовище, зупиняються безпосередньо біля поверхні дна вібробункера. Еквівалентний тиск робочого середовища біля дна вібробункера підвищується на величину $p_{y0}$. Елементи робочого середовища, розташовані вище дна, рухаються за інерцією (за стрілкою $V_1$), натискують на нерухомі елементи, розташовані біля дна, і гальмуються, підвищуючи тиск в області дна і розширює цю область. Утворюється ударна хвиля $F_1F_3F_2$. Фронт ударної хвилі рухається вгору із швидкістю ударної хвилі $V_a$.

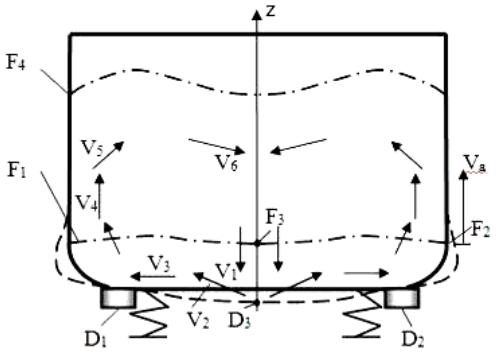



Рис. 3. Закон переміщення корпусу вібробункера при його симетричному ударно-імпульсному навантаженні

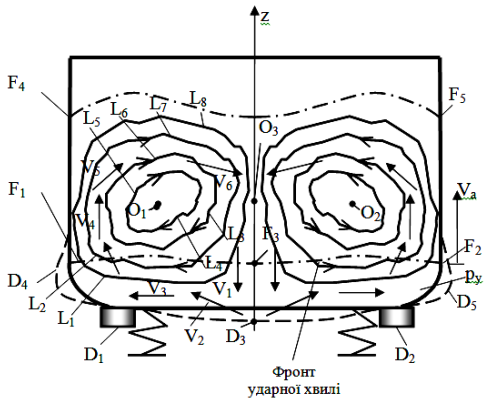



Рис. 4. Схема вісесиметричного вертикального переміщення вібробункера та циркуляційний рух робочого середовища

Третьою причиною є деформації стінок вібробункера в радіальному напрямку (точки $D_4D_5$) (рис. 4). Розширення вібробункера знижує еквівалентний тиск на периферії по відношенню до тиску в центрі. Це приводить до виникнення мікропереміщень елементів робочого середовища від центру до периферії. Переміщення показані стрілками $V_2$ і $V_3$. Фронт ударної хвилі $F_1F_2F_3$ переміщується вгору по висоті вібробункера до тих пір, поки не досягне вільної поверхні робочого середовища. Вільна поверхня внаслідок проходження фронту дещо викривляється і набуває форми кривої $F_4F_5F_6$ (викривлення показано у збільшеному вигляді).

Переміщення елементів робочого середовища спричиняє циркуляційний рух, який формується у радіальних площинах. Еквівалентні лінії течії (траєкторії руху елементів) є замкнутими і являють собою кільцеві лінії, що мають нижні гілки $L_1$, $L_2$, $L_3$, $L_4$ та верхні гілки $L_5$, $L_6$, $L_7$, $L_8$. Циркуляційний рух є повільним. Він охоплює весь об'єм робочого середовища. Циркуляційний рух має вигляд вихрового кільця з центром в точках $O_1$ та $O_2$.

Таким чином, при ударно-імпульсному навантаженні вібробункера в робочому середовищі виникає вихровий циркуляційний рух, який охоплює тороподібну область. В центрі тороподібної області (точки $O_1$ та $O_2$) має місце фокус течії, де її поступальна швидкість близька до нуля.

Час розповсюдження фронту ударної хвилі від дна вібробункера до вільної поверхні є фазою гідравлічного удару $\tau$:

$$\tau = \frac{H}{v_a}, \tag{1}$$

де $H$ – висота робочого середовища; $v_a$ – швидкість ударної хвилі.

Швидкість розповсюдження гідроударної хвилі є невеликою і становить 50...100 м/с. Сили опору в робочому середовищі є надзвичайно інтенсивними. Тому гідроударне підвищення тиску швидко зменшується. Запропоновано як перше наближення, що підвищення тиску в околиці дна вібробункера змінюється за трикутним законом (крива 2 на рис. 5).

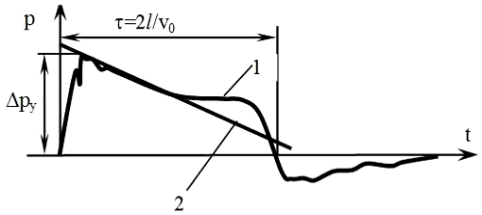
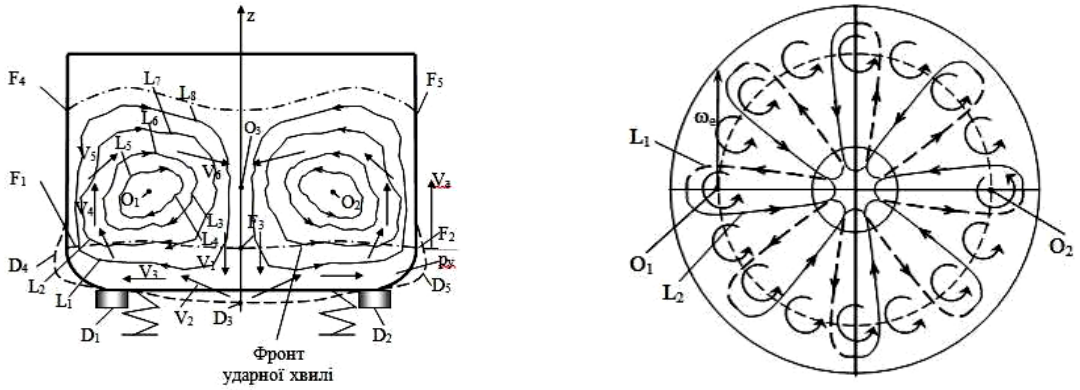



Рис. 5. Схематичний графік зміни гідроударного тиску у вібробункері при гідроударі

© Денисюк В.Ю., Симонюк В.П., Лапченко Ю.С., Кайдик О.Л., Пташенчук В.В.

Підвищення тиску спричинює циркуляційний рух робочого середовища, який направлений від середини дна вібробункера на його периферію (рис. 6). Робоче середовище розповсюджується повільним циркуляційним потоком, для частини потоку відповідної лінії $O_1O_3O_2$ переміщення середовища відбувається під дією еквівалентного тиску.




а) б)

Рис. 6. Циркуляційний рух робочого середовища при симетричному ударно-імпульсному навантаженні: (а) – вигляд збоку; (б) – вигляд згори

Прийнято, що еквівалентний тиск гідроудару становить $\frac{1}{2}p_y$. Даний тиск діє в проміжку часу $\Delta t_B = t_2 - t_1$ між точками 1 і 2 (див. рис. 2, а). При цьому, гідроудар діє в точці 1 і затухає в точці 2. Відповідно, еквівалентний тиск в околиці дна вібробункера складе:

$$p_{Q1} = \frac{1}{2} p_y \cdot \frac{\Delta t_B}{T}. \quad (2)$$

Під дією еквівалентного тиску на лінії $O_1O_3O_2$ має місце течія робочого середовища. Середня швидкість течії $V_c$ визначається за формулою:

$$V_c = a_1 \frac{\Delta t_b}{T} + a_2 E_{\Pi} - a_3 \rho + a_4 V_0, \quad (3)$$

де $a_1$-$a_4$ – постійні, які будуть уточнені по результатам експериментів.

Вихровий циркуляційний рух приводить до повільного обертання маси робочого середовища. Профіль середніх швидкостей в радіальному перетині середовища описується параболічною залежністю. На осі вібробункера швидкість руху робочого середовища змінюється від нульового значення на поверхні та в центральній частині дна вібробункера до деякого максимального в центральній частині робочого середовища (точка $O_3$). Таким чином виникає тороподібний вихровий циркуляційний рух робочого середовища (рис. 6, б).

Інтенсивність циркуляційного руху оцінюється еквівалентною кутовою швидкістю $\omega_e$, що характеризує повільне обертання робочого середовища.

Для оцінки кутової швидкості циркуляційного руху використано залежність:

$$\omega_e = \frac{V_c}{r_c}. \quad (4)$$

Вихрові рухи охоплюють весь об’єм робочого середовища. Інтенсивність вихрового циркуляційного руху при симетричному ударному навантаженні є невеликою. Це пояснюється стабілізуючим впливом окремих вихорів, які є симетричними. Більш інтенсивним є циркуляційний рух при несиметричному ударному навантаженні вібробункера (рис. 7).

При несиметричному навантаженні удар має місце з одного боку вібробункера (точка $D_1$). При цьому ударна хвиля $F_1F_2$ є несиметричною. Підвищення тиску біля дна вібробункера приведе до його деформації. Деформація буде несиметричною, найбільший прогин дна буде зміщено до точки удару. Крім статичних деформацій дна і стінок вібробункера в ньому виникають високочастотні коливання. Це знижує сили тертя елементів робочого середовища по поверхні вібробункера. Дно вібробункера нахилено під деяким кутом до напрямку руху частинок абразиву. Тому інерція робочого середовища спричиняє його переміщення в напрямку стінки (показано стрілкою $V_1$). Це є основною причиною формування інтенсивного циркуляційного руху робочого середовища. Додатковою причиною є проходження фронту

© Денисюк В.Ю., Симонюк В.П., Лапченко Ю.С., Кайдик О.Л., Пташенчук В.В.

ударної хвилі.

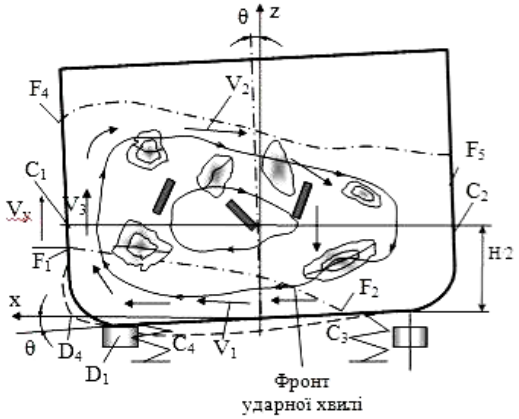



Рис. 7. Циркуляційний рух робочого середовища при несиметричному ударному навантаженні вібробункера

Експериментальні дослідження виконувалися для з'ясування залежності показників інтенсивності та якості віброобробки від амплітуди коливань вібробункера. В якості дослідних зразків використовувались деталі типу тіл обертання, які мають зовнішню і внутрішню циліндричні, плоску і торцеву поверхні, що отримані різними способами (фрезеруванням, точінням) і мають різну початкову шорсткість. Це дало змогу з'ясувати ступінь оброблюваності кожного типу поверхні, оцінити ступінь заокруглення гострих кромок.

В результаті експерименту були отримані наступні значення розмаху коливань контейнера в залежності від завантаженості його робочою сумішшю (таблиця 1).

Таблиця 1

Результати експериментальних вимірювань розмаху коливань контейнера, мм

| Рівень завантаження | | 0 кг | | | 1,5 кг | | | 3 кг | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| № повторності | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| Номер електро-магніту | 1 | 2,0 | 1,5 | 2,0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| | 2 | 2,5 | 1,5 | 2,0 | 1,5 | 1,5 | 2,0 | 1,0 | 1,5 | 1,0 |
| | 3 | 2,5 | 2,5 | 2,0 | 1,5 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| | 4 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,0 | 1,5 | 2,0 | 2 | 1,5 | 1,5 |
| Середнє арифметичне | | 2,4 | 2,0 | 2,1 | 1,6 | 1,4 | 1,6 | 1,2 | 1,2 | 1,1 |
| Середнє квадратичне | | 2,4 | 2,0 | 2,1 | 1,6 | 1,4 | 1,7 | 1,3 | 1,3 | 1,1 |

З таблиці видно, що середнє арифметичне і середнє квадратичне значення розмаху коливань істотно не відрізняються, тобто можна зробити висновок про малі випадкові похибки вимірювань.

Експериментальні вимірювання здійснено безпосередньо у вібробункері. При вимірюванні застосований оптичний метод із покадровим реєструванням положення елементів робочого середовища. Здійснена покадрова зйомка поверхні робочого середовища у вібробункері. Частота кадрів становила 1 с. Обробка фото сусідніх кадрів послужила основою для встановлення координат набору окремих індивідуальних елементів робочого середовища.

Для кількох сусідніх кадрів визначимо координати окремої гранули абразиву або маркера. Встановимо послідовні положення окремих гранул на поверхні робочого середовища. Формується масив векторів положення окремих індивідуальних елементів у вигляді набору векторів, які визначають положення елемента робочого середовища на поверхні у вигляді точок A1, A2, .. An; B1, B2, .. Br; C1, C2, .. Cq. Число точок вибирається достатньо великим для того, щоб описати рух на всій поверхні робочого середовища. Число векторів залежить від того, як довго знаходиться елемент на поверхні робочого середовища. Масив вибраних точок описує траєкторію частинок на всій поверхні робочого середовища. Траєкторія має вигляд ламаних ліній (рис. 8).

© Денисюк В.Ю., Симонюк В.П., Лапченко Ю.С., Кайдик О.Л., Пташенчук В.В.

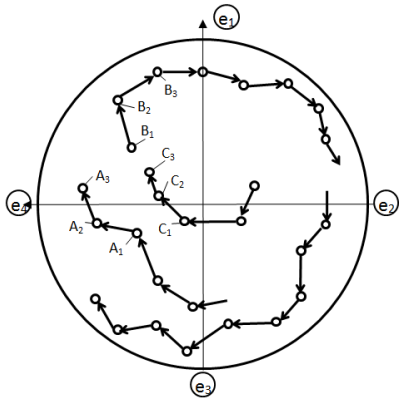



Рис. 8. Типові експериментально визначені траєкторії переміщення гранул на поверхні робочого середовища

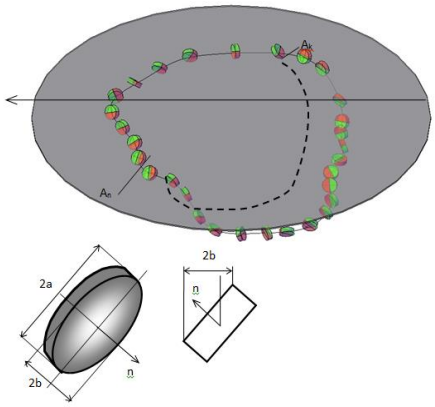



Рис. 9. Визначення поперечно-кутового положення маркера в робочому середовищі та прогноз траєкторії руху елемента в об'ємі робочого середовища

Для визначення швидкості повільного циркуляційного руху робочого середовища визначаються прирости координат елементів у сусідніх положеннях, які формуються у вигляді векторів [7].

Лінійна швидкість переміщення елемента робочого середовища обчислюється за формулою:

$$v_A = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{\Delta t} \cdot R_e,$$

де $\varphi_2$, $\varphi_1$ – кутові координати елемента, визначені по сусіднім кадрам;
$\Delta t$ – інтервал часу між координатами;
$R_e$ – радіус колової траєкторії переміщення елемента робочого середовища.

Покадрова зйомка дає можливість визначити обертальні рухи деталей і гранул абразиву. Для цього застосовують маркери циліндричної форми невеликої величини (у вигляді диска). На окремих кадрах реєструється кутове положення деталі та використовується нормаль до її контрольної поверхні (рис. 9).

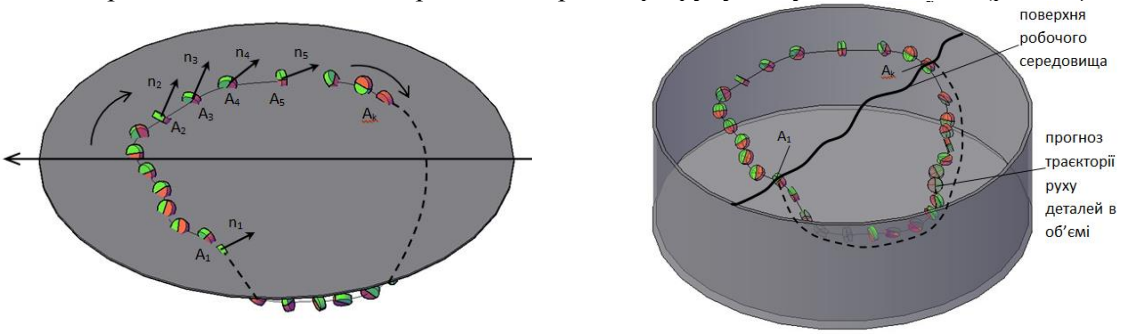
Вектори нормалей по сусіднім кадрам $\vec{n}_2, \vec{n}_3, \vec{n}_4, \vec{n}_5$ визначаються за положенням диска. На фото диск реєструється у вигляді еліпса, різниця вісей якого визначає кути нахилу диска (рис. 9).

Кутове положення деталі визначається кутом $\theta$, який пов'язаний із співвідношенням вісей еліпса, відповідно значення:

$$\theta = \arccos\left(\frac{b}{a}\right).$$

Кутове положення диска в площині вісей координат *xoy* визначається кутом $\varphi$ між малою віссю еліпса та віссю *x*.

Із аналізу покадрової зйомки можна прогнозувати траєкторію руху деталей в об'ємі робочого середовища. Визначення прогнозної траєкторії руху імітується схемою (рис. 10).




а) б)

Рис. 10. Визначення прогнозних значень траєкторії руху деталі в об'ємі робочого середовища (а) – фіксований рух деталі на поверхні; (б) – просторовий рух деталей (прогноз траєкторії показано пунктирною лінією)

© Денисюк В.Ю., Симонюк В.П., Лапченко Ю.С., Кайдик О.Л., Пташенчук В.В.

Для деталі (маркера) А здійснена покадрова зйомка. На кадрах фіксується положення деталі, починаючи з точки $A_1$ і закінчуючи точкою $A_к$. В подальшому здійснювалась покадрова зйомка до тих пір, поки деталь знову не з'явилась на поверхні (близько точки $A_1$). Траєкторія руху деталі показана пунктирною лінією. Вона може бути досить точно прогнозована. Точно визначається час знаходження деталі в об'ємі робочого середовища.

При вивченні процесу віброобробки за часом було встановлено, що зняття металу відбувається достатньо рівномірно протягом всього часу обробки з деяким збільшенням в початковий період, коли відбувається зняття відносно грубих мікронерівностей та закруглення гострих кромок [5].

Із збільшенням зернистості абразивного середовища, тобто розмірів гранул абразивної крихти, зняття металу зростає внаслідок збільшення маси зерен і збільшення глибини їх проникнення в метал, що викликає більш інтенсивну оброблюваність поверхні.

**Висновки.** Сферичний рух вібробункера визначається законом включення електромагнітів і приводить до спіралевидного руху вібробункера в усталених динамічних режимах. Перехідні процеси мають місце при включенні електромагнітів і проявляються у вигляді складних поперчено-кутових переміщеннях вібробункера. Перехідні процеси обумовлюють значні динамічні навантаження на робоче середовище.

В результаті досліджень встановлено, що ударно-імпульсні навантаження на вібробункер приводять до виникнення повільного циркуляційного руху робочого середовища. Даний рух інтенсифікується при несиметричному ударному навантаженні. Циркуляційний рух має вигляд кільцевого або дугоподібного вихрового кільця, яке охоплює весь об'єм робочого середовища. Для визначення характеру вихрового руху допустимим є застосування закону зміни кількості руху в інтегральній формі для виділеного контрольного об'єму робочого середовища. Середня швидкість циркуляційного руху залежить від інтенсивності удару, швидкості вібробункера до удару та маси робочого середовища. Кутова швидкість вихрового руху пропорційна середній швидкості циркуляційного руху.

В робочому середовищі має місце хаотичний рух окремих елементів (гранул абразиву) який обумовлений ударними навантаженнями на гранулу з боку сусідніх гранул. Хаотичний рух проявляється у вигляді відхилень траєкторії руху окремої гранули від середньої траєкторії циркуляційного руху. Відхилення траєкторії близьке до гармонічного (синусоїдального) закону.

**Інформаційні джерела**

1. Бабичев А.П. Технологические испытания абразивных гранул из шлифовального шлама (на полимерном связующем) / А.П. Бабичев, Н.С Зинченко, О.К. Сикизова // Вопросы вибрационной технологии, 2006. – С 214–217.

2. Бабичев А.П. Физико-технологические основы методов обработки: учебное пособие для вузов / А.П. Бабичев. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2006. – 410 с.

3. Николаенко А.П. Исследование зависимости интенсивности вибрационной обработки от расположения вибровозбудителя / А.П. Николаенко, М.А. Калмыков // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2009. – № 2/5(38). – С. 54–57.

4. Струтинський В.Б. Вдосконалення обладнання та процесу ударно-імпульсної обробки деталей у вібробункері: монографія / В.Б. Струтинський, В.П. Симонюк, В.Ю. Денисюк – Луцьк: СПД Гадяк Жанна Володимирівна друкарня "Волиньполіграф"™, 2016. – 139 с.

5. Струтинський В.Б. Дослідження закономірностей повільного циркуляційного вихрового руху робочого середовища у вібробункері / В.Б. Струтинський, В.П. Симонюк, В.Ю. Денисюк / "Перспективні технології та прилади". Збірник статей. Випуск 10(1). м. Луцьк, червень 2017 р. – Луцьк: Луцький НТУ, 2017. – С. 176–185.

6. V. Symonyuk V. Denysiuk, Y. Lapchenko Experimental study of circulating vortex movement working environment in vibrobunker / Mechanics, Materials Science & Engineering Journal. Volume 12, September 2017, Pages 41-54, DOI 10.2412/mmse.58.82.178 provided by.

7. Symoniuk V., Denysiuk V., Lapchenko Y. Processing of Parts Under Pulse Loading of a Vibrating Hopper // In: Ivanov V., Trojanowska J., Pavlenko I., Zajac J., Peraković D. (eds) Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. pp. 411-421 (2020). https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_40

8. Патент 126090 Україна, МПК B24B 31/06 (2006.01). Вібраційна установка / Симонюк В.П., Федорчук О.В., Денисюк В.Ю., Кайдик О.Л., Лапченко Ю.С./ Заявник і патентовласник:

© Денисюк В.Ю., Симонюк В.П., Лапченко Ю.С., Кайдик О.Л., Пташенчук В.В.

Луцький національний технічний університет, Луцьк; заявл. 04.12.2017; опубл. 11.06.2018; Бюл. №11. – 4 с.

**Денисюк В.Ю.,** *к.т.н.,* **Симонюк В.П.,** *к.т.н.,* **Лапченко Ю.С.,** *к.т.н.,* **Кайдик О.Л.,** *к.т.н.,* **Пташенчук В.В.,** *к.т.н.*
Луцкий национальный технический университет

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ПРИ УДАРНО-ИМПУЛЬСНОЙ НАГРУЗКЕ ВИБРОБУНКЕРА

*В статье представлены результаты исследований закономерностей циркуляционного вихревого движения рабочей среды и перемещения корпуса вибробункера при его симметрической ударно-импульсной нагрузке. Установлено, что ударно-импульсные нагрузки на вибробункер приводят к возникновению медленного циркуляционного движения рабочей среды, которое интенсифицируется при несимметрической ударной нагрузке. Представлены результаты экспериментальных исследований процесса вибрационной обработки деталей, проверена воспроизводимость эксперимента и достоверность полученных результатов. Осуществлен анализ технологических возможностей виброобработки в широком диапазоне частоты и размаха колебаний. Наглядно представлены причины проблематичности выбора оптимальных режимов виброобработки и возможные направления их преодоления. Осуществлено моделирования различных режимов работы вибрационной установки. Анализ результатов позволил выявить принципы оптимального подбора режимов виброобработки. Установлено способ достижения режима работы вибрационной установки с максимально эффективным использованием механической энергии колебаний.*

***Ключевые слова:*** *вибрационная абразивная обработка, вибробункер, циркуляционный движение, электромагнит, абразивный материал, ударная волна.*

**V. Denysiuk, V. Symonyuk, Y. Lapchenko, O. Kaidyk, V.Ptachenchuk**
Lutsk National Technical University

## RESEARCH OF PROCESSES OF PROCESSING OF PARTS DURING IMPULSE IMPULSE LOADING OF THE VIBROBUNKER

*The article presents the results of studies of the patterns of circulating vortex motion of the working medium and the movement of the body of the vibrating hopper under its symmetrical shock-pulse load. It is established that shock-pulse loads on the vibrating hopper lead to a slow circulating motion of the working medium, which intensifies under asymmetric shock load. The results of experimental researches of the process of vibration processing of details are presented, the reproducibility of the experiment and the reliability of the obtained results are checked. The analysis of technological possibilities of vibration processing in a wide range of frequency and amplitude of oscillations is carried out. The reasons for the difficulty of choosing the optimal modes of vibration processing and possible ways to overcome them are clearly presented. Simulation of different modes of operation of the vibrating installation is carried out. The analysis of the results made it possible to identify the principles of optimal selection of vibration processing modes. The method of achieving the mode of operation of the vibrating installation with the most efficient use of mechanical vibration energy is established.*

***Keywords:*** *vibration abrasive treatment, vibrating hopper, circulating motion, electromagnet, abrasive material, shock wave.*

© Денисюк В.Ю., Симонюк В.П., Лапченко Ю.С., Кайдик О.Л., Пташенчук В.В.

УДК 621.87.21
**Диня В.І., Білик С.Г.**
Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України «Бережанський агротехнічний інститут»

# ОБГРУНТУВАННЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗАГОТОВОК СПЕЦІАЛЬНИХ ЗІРОЧОК ТРУБЧАСТИХ КОНВЕЄРІВ

*Підвищення продуктивності праці в агропромисловому комплексі, харчовій, переробній промисловостях, та інших спонукає до розширення технологічних можливостей транспортуючих пристроїв, які мають широке застосування у технологічних процесах механізованого завантаження сипких матеріалів сільськогосподарського виробництва. При цьому важливим є виготовлення робочих органів транспортуючих і змішувальних пристроїв у вигляді окремих секцій.*

*В сільському господарстві трубчасті конвеєри набули широкого застосування для транспортнування сипких матеріалів, а також в хімічному машинобудуванні, верстатобудуванні, гірничорудному устаткуванні і підйомно-транспортуючих пристроях. Одним із важливих питань надійності роботи гнучкого трубчастого конвеєра є забезпечення надійності роботи приводі односторонньої дії, які здійснюють передачі крутних моментів в одному напрямку, а в іншому його стопоріння. Такі приводи широко використовують у сільськогосподарських машинах, мотоциклах, велосипедах, насосах, та інших транспортних технологіях.*

*Важливим моментом при виробництві таких приводів є розроблення прогресивного технологічного процесу виготовлення привідних дисків (зірочок), які мають складний профіль для технології їх виготовлення.*

**Ключові слова:** *техніко-економічне обґрунтування, зірочок трубчастих конвеєрів, технологічні процеси.*

**Огляд та аналіз попередніх досліджень.** Питаннями виготовлення тонкостінних заготовок різних деталей присвячені роботи науковців Жолобов О.О., Кирилович В.А., Мельничук П.П., Яновський В.А. [1], Гевко Б.М., Гевко І.Б., Радик Д.Л. [2], Гурик О.Я., Диня В.І., Олексишин О.В. [3], та інші. Однак цілий ряд виготовлення специфічних деталей приводних дисків трубчастих конвеєрів потребують свого подальшого вирішення і дослідження.

**Виклад основного матеріалу.** При визначенні техніко-економічних параметрів виготовлення заготовок дисків трубчастих конвеєрів наведено порівняння трьох технологічних процесів з відповідними операціями, затратами часу і розходом матеріалів. В багатьох випадках при розрахунках не було включено капітальних витрат, оскільки виробництво не є серійним або крупно серійним чи масовим, а порівняння проведемо в умовах діючого виробництва з використанням різних технологічних процесів оброблення. На рис.1 приведена схема приводу гнучкого трубчастого конвеєра, який забезпечує транспортування аипких матеріалів по криволінійних трасах [4].

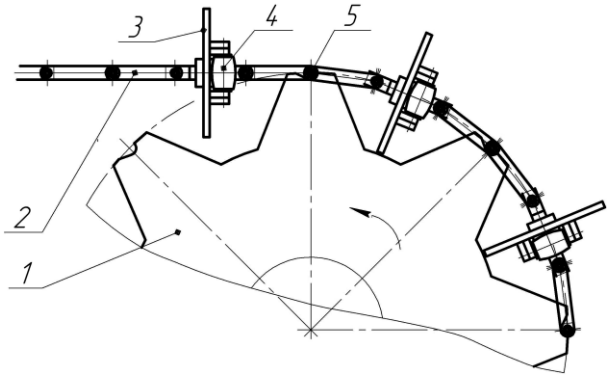
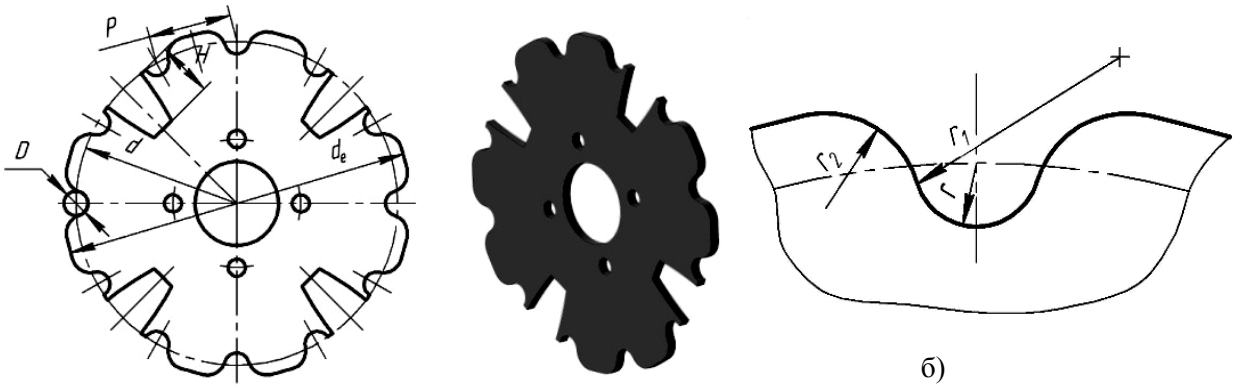



Рис. 1. Приводний механізм гнучкого трубчастого конвеєра:
1 – спеціальний приводний елемент; 2 – приводний безвтулковий ланцюг;
3 – круглі подаючі диски; 4 – опорні еластичні ролики; 5 – поверхня зачеплення.

**© Диня В.І., Білик С.Г.**

На рис.2 представлена конструкціяспеціальної приводної зірочки гнучкого трубчастого конвеєра.

Крім опрацьованих у роботі варіанту механічного оброблення заготовки спеціальної зірочки [1], альтернативні варіанти виготовлення заготовки базуються на застосуванні лазерної і плазмової технології.




а) б)

Рис. 2. Конструкція спеціальної приводної зірочки: а) зірочка; б) конструктивні параметри впадини

Плазмове різання металу – різновидність оброблення, у результаті якого в якості різального інструменту використовується нагріта за допомогою електричної дуги до надвисокої температури струменем повітря в іонізованому стані. Між електродом і металом, який необхідно різати, запалюється електрична дуга. Газ під високим тиском (декілька атмосфер) подається в сопло, а електрична дуга перетворює газ в струмінь плазми (температура:5000-30000 градусів, швидкість різання: від 500 до 1500 м/сек.)

Технічна характеристика процесу плазмового різання: точність позиціювання з використанням комп'ютерного проектування розміщення деталей на площині стола – 0,1 мм; точність плазмової різки ±0,25 мм, шорсткість Rz – 60-80, максимальний габарит листового металу – 1500х3000 мм.

В основі лазерного різання лежить технологія розрізання матеріалу лазерним променем регулювання потужності. Лазерне різання, обладнання якого дозволяє працювати з товщиною матеріалу ≤ 20мм є передовою технологією і дозволяє отримати найточніше розрізання матеріалу.

Суть технологічного процесу різання простий. Лазерний промінь фокусується на поверхні оброблювального металу й нагріває його до надвисоких температур. Метал починає плавитися і випаровуватися. Лазерне різання металу дозволяє уникнути великої кількості відходів при забезпеченні високої точності заготовки.

У процесі різання відсутній будь-який механічний вплив. Висока точність дозволяє вирізати складні конструкції без дефектів, нерівностей зрізу і задирок. Будь-які деталі після лазерного різання не потребують додаткового оброблення. Точність лазерного різання досить висока, як правило, допуск лежить у межах 0,1–0,01мм.

Для різання металу використовують верстати на основі газових $CO_2$– лазерів. Лазерні установки працюють у безперервному або імпульсно-періодичному режимі випромінювання.

Нижче подано три варіанти оброблення спеціальної зірочки з застосуванням кооперацій ної технології оброблення на металорізальних верстатах плазмового та лазерного оброблення (табл.1).

Собівартість плазмового та лазерного оброблення взято з Інтернету пропозицій фірм Амадей (верстат плазмового різання Thermal Dunamics, США і верстат лазерного різання Bystronic Bystar 4025, Швеція).

Застосування штампованої листової заготовки з механічним обробленням деталі (варіант 1) і лазерного різання (варіант 3) є приблизно рівноцінні витрати за вартістю, проте варіант 3 спрямований на зменшення виробничих витрат.

© Диня В.І., Білик С.Г.

**Таблиця 1**

Порівняльні технології виготовлення спеціальної лазерної зірочки (вихідні дані)

| Варіант 1. Поопераційна технологія механічного оброблення | | Варіант 2. Технологія оброблення плазмовим різанням металу | | Варіант 3. Технологія лазерного оброблення | |
|---|---|---|---|---|---|
| Операція | $T_{шт,}$ ,хв | Операція | $T_{шт,}$ ,хв | Операція | $T_{шт,}$ ,хв |
| Різання і штампування заготовки | 3,1 | Плазмове різання | 1700* | Лазерне різання | 1980* |
| Токарне оброблення | 8,7 | Токарне оброблення | 5,6 | Токарне оброблення | 2,2 |
| Зубофрезерне оброблення | 7,8 | Зубофрезерне оброблення | 7,8 | | |
| Пресова | 3,2 | | | | |
| *подано довжину різання (мм) | | | | | |
| Розхід матеріалу (кг) Лист 12 Сталь 45 | | | | | |
| 9,2 | | 7,6 | | 6,8 | |
| Вартість заготовки (грн) (Вартість 1т – 11940грн) | | | | | |
| 91,50 | | 75,60 | | 67,60 | |

Собівартість 1м плазмового різання – 14,60 грн.

Собівартість 1м лазерного різання – 18,66 грн.

Собівартість (середня) 1м. год. механічного оброблення за даними заводу “Техінмаш” (м.Тернопіль) становить 38,8 грн.

Розрахунок собівартості оброблення деталі за різними технологічними процесами зведено у табл. 2.

**Таблиця 2**

Зведений розрахунок собівартості виготовлення зірочки

| Статті витрат | Вартість (грн.) | | |
|---|---|---|---|
| | Варіант 1 | Варіант 2 | Варіант 3 |
| Матеріали | 91,50 | 76,50 | 67,60 |
| Технологічні і виробничі витрати | 14,74 | 33,48 | 39,36 |
| Усього | 106,24 | 109,98 | 106,94 |

**Висновки.** На основі проведених досліджень можна зробити наступні висновки.

1. Проведено порівняльний аналіз техніко-економічного обґрунтування процесів виготовлення приводних зірочок транспортних конвеєрів способами штампування, лазерної і плазмової технологій.

2. Проведено техніко-економічний розрахунок 3х технологічних процесів виготовлення зірочок трубчастих конвеєрів і встановлена доцільність використання лазерного оброблення.

**Інформаційні джерела**

1. Жолобов О.О., Кирилович В.А., Мельничук П.П., Яновський В.А. Технологія автоматизованого виробництва. Житомир. ЖДТУ. 2008. 14 с.

2. Гевко Б.М., Гевко І.Б., Радик Д.Л. Технологія сільськогосподарського машинобудування. Київ: Кондор. 2006. 496с.

3. Гурик О.Я., Диня В.І., Олексишин О.В. Особливості конструкції приводів гнучких трубчастих конвеєрів. Транспортні технології. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка зб. наук. праць. Харків. 2011. Вип. 111. С. 104 - 111.

4. Диня В.І. Підвищення ефективності виготовлення деталей приводних механізмів машин односторонньої дії. Автореферат кандидата технічних наук. Тернопіль. 2012. ТНТУ імені Івана Пулюя. 20 с.

5. Гевко Б.М. та інші. Технологія сільськогосподарського машинобудування. К. Кондор. 2006. 490с.

© **Диня В.І., Білик С.Г.**

6. Диня В.І. Підвищення ефективності виготовлення деталей приводних механізмів машин односторонньої дії. Автореферат кандидата технічних наук. Тернопіль. 2012 ТНТУ імені Івана Пулюя. 20 с.

7. Диня В.І. Техніко-економічне обґрунтування технологічного процесу виготовлення заготовок спеціальних зірочок трубчастих конвеєрів. Матеріали п'ятнадцятої наукової конференції Тернопільського національного технічного університету. Тернопіль. ТНТУ. 25 с.

**Dynja V., Bilyk S.**
Separated Subdivision of National University of Life and Environmental Sciences
of Ukraine Berezhany Agrotechnical institute

**RATIONALE FOR MANUFACTURE OF PREPARATIONS OF SPECIAL STARS OF TUBULAR CONVEYORS**

*Increasing labor productivity in the agro-industrial complex, food, processing industries, and others encourages the expansion of technological capabilities of transport devices, which are widely used in technological processes of mechanized loading of bulk materials of agricultural production. It is important to manufacture the working bodies of transporting and mixing devices in the form of separate sections.*

*In agriculture, tubular conveyors have become widely used for the transportation of bulk materials, as well as in chemical engineering, machine tools, mining equipment and hoisting and transporting devices. One of the important issues of reliability of the flexible tubular conveyor is to ensure the reliability of the one-way drive, which transmits torque in one direction, and in the other its locking. Such drives are widely used in agricultural machinery, motorcycles, bicycles, pumps, and other transportation technologies.*

*An important point in the production of such drives is the development of a progressive technological process for the manufacture of drive disks (sprockets), which have a complex profile for the technology of their manufacture.*

**Key words:** *technical and economic substantiation, stars of tubular conveyors, technological processes.*

**Дыня В.И., Билык С.Г.**
Обособленное подразделение Национального университета биоресурсов и природопользования Украины «Бережанский агротехнический институт»

**ОБОСНОВАНИЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗАГОТОВОК СПЕЦИАЛЬНЫХ ЗВЕЗД ТРУБЧАТЫХ КОНВЕЙЕРОВ**

*Повышение производительности труда в агропромышленном комплексе, пищевой, перерабатывающей промышленностях и других побуждает к расширению технологических возможностей транспортирующих устройств, имеющих широкое применение в технологических процессах механизированной загрузки сыпучих материалов сельскохозяйственного производства. При этом важно изготовления рабочих органов транспортирующих и смесительных устройств в виде отдельных секций.*

*В сельском хозяйстве трубчатые конвейеры получили широкое применение для транспортнування сыпучих материалов, а также в химическом машиностроении, станкостроении, горнорудном оборудовании и подъемно-транспортирующих устройствах. Одним из важных вопросов надежности работы гибкого трубчатого конвейера является обеспечение надежности работы поводу одностороннего действия, которые осуществляют передачи крутящих моментов в одном направлении, а в другом его стопорения. Такие приводы широко используются в сельскохозяйственных машинах, мотоциклах, велосипедах, насосах и других транспортных технологиях.*

*Важным моментом при производстве таких поводов является разработка прогрессивного технологического процесса изготовления приводных дисков (звездочек), которые имеют сложный профиль для технологии их изготовления.*

**Ключевые слова:** *технико-экономическое обоснование, звездочек трубчатых конвейеров, технологические процессы.*

**© Диня В.І., Білик С.Г.**

УДК 633.356.4
**Дубчак Н. А., Кирик О. М.**
Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України «Бережанський агротехнічний інститут»

# ОБҐРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ КОНСТРУКТИВНО-КІНЕМАТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РОБОЧИХ ОРГАНІВ АДАПТОВАНИХ КОРЕНЕЗБИРАЛЬНИХ МАШИН

*Зрізування гички, викопування та очищення коренеплодів від домішок залежить не тільки від конструкції та параметрів робочих органів коренезбиральної машини, але й від агробіологічних і фізико-механічних характеристик коренеплодів у період їх збирання. Вибір конструкції робочих органів і налаштування параметрів і режимів роботи модуля для зрізування гички, викопувальних і очисних модулів самохідних коренезбиральних комбайнів регламентовані розмірними параметрами та формою коренеплодів і фізико-механічним станом навколоплідного грунтового середовища. Отримані теоретичні математичні моделі (1) і (2) та емпіричні залежності (3)-(7) можуть бути використані для подальшої розробки та обґрунтування раціональних конструктивно-кінематичних параметрів робочих органів адаптованих коренезбиральних машин. Наведено результати експериментальних досліджень маси та товщини шару налиплого ґрунту на поверхні тіла викопаних коренеплодів залежно від їх розмірних характеристик і фізичного стану ґрунту. Встановлено, що маса налиплого грунту змінюється в межах від 10…220 г для кормових буряків, 35…290 г для цукрових буряків, до 90 г для столових буряків, до 65 г для моркви, 20…360 г для коренеплодів цикорію.*

**Ключові слова:** *кормові, цукрові, столові буряки; морква; коренеплоди цикорію; маса налиплого грунту; товщина шару грунту; вологість грунту.*

**Постановка проблеми.** Агробіологічні (розмірно-масові) та фізико-механічні властивості різних видів культур коренеплодів (кормових, цукрових, столових буряків, моркви, коренеплодів цикорію) під час їх збирання мають значний вплив на технологічний процес роботи машини та випадковий характер і коливаються в певних межах [1-5].

Проблеми аналізу та синтезу робочих органів для викопування та очищення коренеплодів від домішок, а особливо очищення коренеплодів від налиплого ґрунту на їх поверхнях, потребують передусім наявність наукової уяви про кількісні (масові) характеристики налиплого ґрунту на етапі викопування коренеплодів залежно від вологості та щільності грунту, розмірних характеристик коренеплодів і їх залягання в ґрунті [6-9], або в загальному – від наявного стану навколоплідного грунтового середовища.

Розробка оптимальних типів і обґрунтування раціональних конструктивно-кінематичних параметрів робочих органів, структурної побудови та їх послідовності конструктивного розміщення у технологічно-компонувальних схемах базових модулів адаптованих самохідних коренезбиральних машин, повинно виконуватися на основі аналітичного та емпіричного моделювання вірогідних агробіологічних і фізико-механічних характеристик коренеплодів з врахуванням множини умов протікання технологічного процесу збирання різних культур і форм коренеплодів.

**Огляд та аналіз попередніх досліджень.** Аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що в наукових працях недостатньо висвітлено питання, які характеризують результати експериментальних досліджень маси та товщини шару налиплого ґрунту на поверхні тіла коренеплодів у початковий момент їх викопування. У них наведено тільки загальні показники якості роботи коренезбиральних машин. Результати теоретичних досліджень даної наукової задачі наведено в працях, але перевірка адекватності розроблених моделей не проводилася.

Тому задачею дослідження є емпіричне обґрунтування функціональної зміни маси та товщини шару налиплого ґрунту на поверхні тіла викопаних коренеплодів від їх розмірних характеристик і фізичного стану ґрунту.

**Виклад основного матеріалу.** У результаті проведення теоретичних досліджень було одержано аналітичні залежності, які характеризують зміну прогнозування ймовірної маси $m_{гр}$ та товщини шару налиплого ґрунту $\delta_{гр}$ на поверхні тіла коренеплодів у початковий момент їх викопування від розмірних характеристик коренеплодів і фізичного стану ґрунту:

© Дубчак Н. А., Кирик О. М.

$$m_{гр} = \frac{\pi\rho_{гр}}{k_W}\left[\frac{4}{3}\left(\frac{2L_k}{D_k}-1\right)\delta_{гр}^3 + 3L_k k_{H_1L_k}\delta_{гр}^2 + L_k^2 k_{H_1L_k}^2\left(\frac{2L_k}{D_k}-1\right)^{-1}\delta_{гр}\right]; \quad (1)$$

$$\delta_{гр} = 0{,}25\lambda\sqrt[3]{\frac{1}{\varepsilon\sqrt{\lambda}}}\left(\sqrt[3]{24_{гр}\lambda^2 - 9\eta^2\varepsilon + 0{,}5\sqrt{4\lambda^3\left(9\eta^3\varepsilon - 24m_{гр}\lambda^2\right)^2 - \left(5\eta^3\right)^3\varepsilon^2}} + \sqrt[3]{24m_{гр}\lambda^2 - 9\eta^2\varepsilon - 0{,}5\sqrt{4\lambda^3\left(9\eta^3\varepsilon - 24m_{гр}\lambda^2\right)^2 - \left(5\eta^3\right)^3\varepsilon^2}}\right) - \frac{3\eta}{4\lambda}, \quad (2)$$

де $\rho_{гр}$ – питома маса ґрунту, г/см$^3$;

$L_k$, $D_k$ – довжина та діаметр головки коренеплоду, см;

$k_{H_1L_k}$ – коефіцієнт відношення глибини залягання коренеплоду в ґрунті до його довжини;

$k_W$ – коефіцієнт вологості ґрунту;

$\lambda = \left(2L_k / D_k\right) - 1$;

$\eta = L_k k_{H_1L_k}$ – глибина залягання коренеплоду в ґрунті, см;

$\varepsilon = \pi\rho_{гр} / k_W$.

Для підтвердження теоретичних закономірностей функціональної зміни маси та товщини шару налиплого ґрунту на поверхні тіла викопаних коренеплодів (1) і (2) провели польові експериментальні дослідження за зміни діапазону вологості ґрунту від 17% до 25%. Для проведення дослідження було використано експериментальні установки (рис. 1).

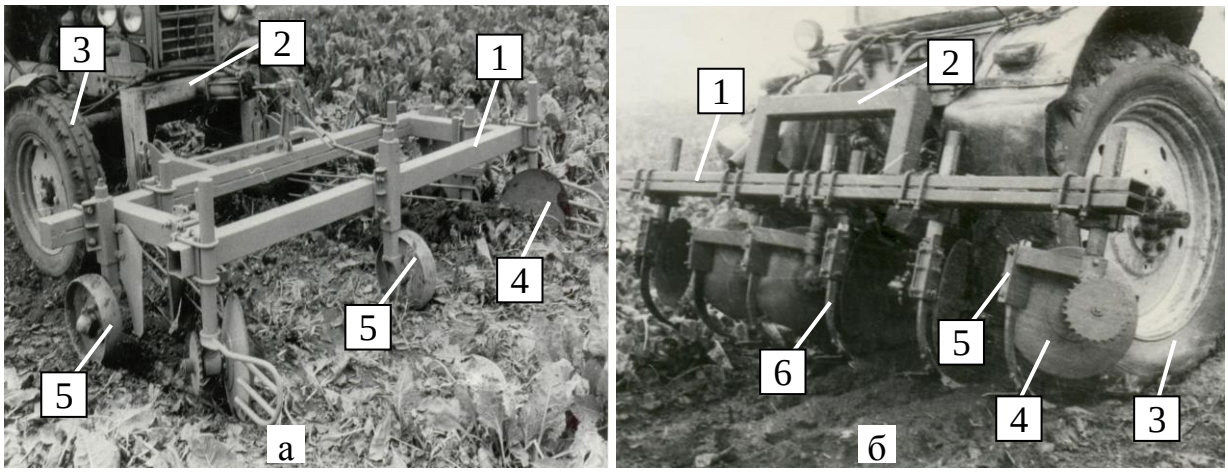



**Рис 1.** Загальний вигляд агрегату: а – для викопування коренеплодів цукрових, кормових і столових буряків; 1 – рама; 2 – сниця; 3 – трактор; 4 – сферичний диск; 5 – опорне регулювальне колесо; б – для викопування моркви та коренеплодів цикорію; 1 – рама; 2 – сниця; 3 – трактор; 4 – сферичний диск; 5 – стояк; 6 – розрихлювач

Перед початком кожного експерименту брали визначали вологість грунту залікової ділянки поля на глибині ходу копача за стандартною методикою. Досліди проводили в різні добові строки та в відмінних кліматичних умовах на різних полях. Урожайність коренеплодів залікової ділянки, ширина якої становила 2,7 м (6 рядків коренеплодів з міжряддями 0,45 м), а довжина 15 м та висоту розташування коренеплодів відносно поверхні поля визначали за відомою методикою. Гичку, перед викопуванням коренеплодів, зрізували гичкозбиральною машиною. Після викопування коренеплодів пристроєм, який утворював їх валок, залишки гички на деяких коренеплодах дорізували вручну. Налиплий грунт з поверхні тіла викопаних коренеплодів очищували вручну (рис. 2), який зважували з похибкою ±1,0 г. При цьому після зчищення грунту з поверхні тіла кожного коренеплоду визначали його діаметр головки та загальну довжину коренеплоду з похибкою ± 0,1 см.

**© Дубчак Н. А., Кирик О. М.**

**Рис. 2.** Загальний вигляд коренеплодів: а – столових буряків; б – моркви

Характеристика факторів та рівні їх варіювання наведені в (табл. 1).

Таблиця 1

Характеристика та рівні варіювання фактора

| Найменування та позначення фактора | Рівні варіювання (-1; 0; +1) |
|---|---|
| Діаметр головки коренеплоду $D_k$, см | Цукрові буряки: 8,0-12,0-16,0<br>Кормові буряки: 14,0-20,0-26,0<br>Столові буряки: 6,0-9,0-12,0<br>Морква: 3,0-5,0-7,0<br>Коренеплоди цикорію: 5,0-9,0-13,0 |
| Коефіцієнт відношення $k_{H_1L_k}$ | Цукрові буряки, морква: 0,8-0,9-1,0<br>Кормові, столові буряки:<br>0,3-0,5-0,7<br>Коренеплоди цикорію: 0,7-0,8-0,9 |
| Коефіцієнт вологості грунту $k_W$ | Цукрові, кормові, столові буряки, морква, коренеплоди цикорію:<br>0,7-0,98-1,26 |

Загальну довжину коренеплоду вимірювали до поперечного перерізу його хвостової частини діаметром 1,0 см. Глибину залягання коренеплоду в грунті визначали, як різницю загальної довжини та висоти розташування коренеплоду над поверхнею грунту. Вагу коренеплоду визначали з похибкою ± 0,1 кг. Після визначення вологості ґрунту, з усього напрацьованого масиву даних, утворювали вибірку конкретного значення вологості ґрунту для коренеплодів різних розмірних характеристик.

Отримані числові дані кожного з експериментів заносили у стовбці відповідної таблиці факторного експерименту, при цьому обробку експериментального масиву даних провели з використанням прикладної програми для ПК Statistica 10.

Параметр оптимізації, тобто $m_{гр,i}$ та $\delta_{гр,i}$ знаходили у вигляді математичної моделі повного квадратного полінома.

Визначали коефіцієнт вологості грунту $k_W$, при цьому розбіжність отриманих експериментальних і прийнятих табличних значень вологості грунту не перевищувала ± 0,5 %, або розбіжність коефіцієнта вологості $k_W$ не перевищувала ± 0,03.

Коефіцієнт $k_{H_1L_k}$ визначали числовим методом з похибкою ± 0,05.

Після оцінки статистичної значущості коефіцієнтів рівняння регресії за критерієм Стюдента та перевірки адекватності емпіричного розподілу випадкових величин рівнянь регресії реальному експериментальному процесу за критерієм Фішера отримали рівняння

© Дубчак Н. А., Кирик О. М.

регресії, які характеризують зміну маси $m_i$ та товщини шару $\delta_i$ налиплого грунту на поверхні тіла коренеплодів від $D_k$, коефіцієнтів $k_{H_1L_k}$ і $k_{W\gamma}$ у натуральних величинах:

- для коренеплодів кормових буряків

$$\begin{cases} m_K = 40{,}47 + 4{,}45D_k + 203{,}6k_{H_1L_k} - 176{,}5k_W + 5{,}5D_k k_{H_1L_k} - 6{,}43D_k k_W - \\ \quad - 120{,}5k_{H_1L_k}k_W + 2{,}82D_k^2 - 0{,}08k_{H_1L_k}^2 + 114{,}19k_W^2; \\ \delta_K = 1{,}91 - 0{,}04D_k - 1{,}29k_{H_1L_k} - 2{,}25k_W + 0{,}003D_k k_{H_1L_k} + 0{,}004D_k k_W + \\ \quad + 0{,}24k_{H_1L_k}k_W + 0{,}001D_k^2 + 1{,}22k_{H_1L_k}^2 + 0{,}94k_W^2 \end{cases}; \quad (3)$$

- для коренеплодів цукрових буряків

$$\begin{cases} m_Ц = -137{,}76 + 27{,}74D_k - 29{,}55k_{H_1L_k} + 57{,}9k_W + 1{,}79D_k k_{H_1L_k} - 12{,}24D_k k_W - \\ \quad - 611{,}82k_{H_1L_k}k_W - 0{,}39D_k^2 + 479{,}71k_{H_1L_k}^2 + 222{,}35k_W^2; \\ \delta_Ц = -1{,}69 + 0{,}024D_k + 3{,}2k_{H_1L_k} + 0{,}68k_W - 0{,}01D_k k_{H_1L_k} - 0{,}01D_k k_W - \\ \quad - 0{,}77k_{H_1L_k}k_W - 1{,}22k_{H_1L_k}^2 - 0{,}05k_W^2 \end{cases}; \quad (4)$$

- для коренеплодів столових буряків

$$\begin{cases} m_C = 122{,}54 + 1{,}2D_k - 184{,}13k_{H_1L_k} - 129{,}74k_W + 7{,}17D_k k_{H_1L_k} - 5{,}48D_k k_W - \\ \quad - 19{,}31k_{H_1L_k}k_W + 0{,}2D_k^2 + 227{,}28k_{H_1L_k}^2 + 62{,}24k_W^2; \\ \delta_C = 0{,}16 - 0{,}1D_k + 0{,}02k_{H_1L_k} - 0{,}19k_W + 0{,}004D_k k_{H_1L_k} - 0{,}004D_k k_W + \\ \quad + 012k_{H_1L_k}k_W - 0{,}17k_{H_1L_k}^2 + 0{,}04k_W^2 \end{cases}; \quad (5)$$

- для коренеплодів моркви

$$\begin{cases} m_M = 35{,}84 + 17{,}21D_k - 73{,}02k_W - 18{,}75D_k k_W + 0{,}62D_k^2 + 44{,}69k_W^2; \\ \delta_M = 0{,}11 + 0{,}02D_k - 0{,}2k_W - 0{,}02D_k k_W + 0{,}09k_W^2 \end{cases}. \quad (6)$$

- для коренеплодів цикорію

$$\begin{cases} m_{КЦ} = 15{,}63 + 12{,}42D_k - 38{,}12k_W - 9{,}75D_k k_W + 0{,}32D_k^2 + 20{,}58k_W^2; \\ \delta_{КЦ} = 0{,}06 + 0{,}012D_k - 0{,}09k_W - 0{,}008D_k k_W + 0{,}05k_W^2 \end{cases}. \quad (7)$$

Отримані емпіричні моделі (3)-(7) можуть бути застосовані для визначення маси $m_i$ та товщину шару $\delta_i$ налиплого ґрунту на поверхні тіла викопаних коренеплодів залежно від зміни діаметра коренеплоду $D_k$, коефіцієнта $k_{H_1L_k}$ та коефіцієнта вологості ґрунту $k_W$.

Аналіз емпіричних моделей, або рівнянь регресії (3)-(7) показує, що основними складовими величинами, які мають значний вплив на зміну маси $m_i$ налиплого грунту на поверхні тіла викопаних коренеплодів є коефіцієнт $k_{H_1L_k}$, або коефіцієнт співвідношення глибини залягання коренеплоду в грунті до його загальної довжини та коефіцієнт вологості грунту $k_W$. Зміна діаметра коренеплоду $D_k$ має не суттєве значення на кінцевий результат.

**Висновки.** Отримані теоретичні математичні моделі (1) і (2) та емпіричні залежності (3)-(7) можуть бути використані для подальшої розробки та обґрунтування раціональних конструктивно-кінематичних параметрів робочих органів адаптованих коренезбиральних

© Дубчак Н. А., Кирик О. М.

машин.

**Інформаційні джерела**


1. Гурченко О. П., Барановський В. М. Результати випробування модернізованої коренезбиральної машини МКК-6А. Механізація та електрифікація сільського господарства. 1995. № 81. С. 57–60.
2. Барановський В. М., Соломка В. О., Онищенко В. Б. Вибір параметрів при конструюванні гвинтового конвеєра. Вісник ХДТУСГ. 2001. Т. 8(2). С. 209–215.
3. Барановський В. М. Конструктивно-технологічні принципи адаптизації транспортно-очисного комбінованого робочого органа коренезбиральних машин. Сільськогосподарські машини. 2005. Вип. 13. С. 18–24.
4. Барановський, В. М. Конструктивно-технологічні принципи застосування адаптивного викопувального робочого органу коренезбиральних машин. Науковий вісник НАУ. 2005. № 73(1). С. 249–255.
5. Барановський В. М., Паньків М. Р., Дубчак Н. А. Очисна система вороху коренеплодів. Механізація сільськогосподарського виробництва. 2007. № 1(59). С. 33–36.
6. Барановський В. М., Дубчак Н. А., Онищенко В. Б., Паньків М. Р. Математичні моделі маси налиплого грунту на коренеплодах кормових буряків. Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження. 2008. № 12(2). С. 314–326.
7. Барановський В. М. Результати теоретично-експериментальних досліджень секундної подачі вороху коренеплодів. Механізація сільськогосподарського виробництва. 2008. № 1. С. 111–120.
8. Барановський В. М., Рамш В. Ю.Оптимізаційні математичні моделі процесу викопування вороху коренеплодів пасивним сферичним диском. Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження. 2008. № 12(2). С. 337–349.
9. Барановський В. М., Герасимчук Г. А. Критерії оцінки технологічної ефективності процесу викопування коренеплодів. Вісник Львівського. національного аграрного університету: агроінженерні дослідження. 2009. № 14. С. 163–168.
10. Рамш В. Ю., Барановський В. М., Паньків М. Р., Герасимчук Г. А. Аналіз тенденцій розвитку робочих органів для сепарації вороху коренеплодів. Наукові нотатки. 2011. Вип. 31. С. 298–305.


**Dubchak N.A., Kyryk O.M.**
Separated Subdivision of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine Berezhany Agrotechnical institute

## JUSTIFICATION OF RATIONAL CONSTRUCTIVE-KINEMATIC PARAMETERS OF WORKING BODIES OF ADAPTED ROOT COLLECTING MACHINES

*Pruning, digging and cleaning of roots from impurities depends not only on the design and parameters of the working bodies of the root harvesting machine, but also on the agrobiological and physico-mechanical characteristics of roots during harvesting. The choice of design of working bodies and adjustment of parameters and modes of operation of the module for cutting of a hyphen, digging and clearing modules of self-propelled root harvesters are regulated by dimensional parameters and the form of root crops and physical and mechanical condition of amniotic soil environment. The obtained theoretical mathematical models (1) and (2) and empirical dependences (3) - (7) can be used for further development and substantiation of rational constructive-kinematic parameters of working bodies of adapted root-harvesting machines. The results of experimental studies of the mass and thickness of the layer of sticky soil on the body surface of excavated roots depending on their dimensional characteristics and physical condition of the soil are presented. It is established that the mass of sticky soil varies from 10… 220 g for fodder beets, 35… 290 g for sugar beets, up to 90 g for table beets, up to 65 g for carrots, 20… 360 g for chicory roots.*

**© Дубчак Н. А., Кирик О. М.**

**Дубчак Н. А., Кирик О. М.**
Обособленное подразделение Национального университета биоресурсов и природопользования Украины «Бережанский агротехнический институт»

## ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ-КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО ОРГАНА АДАПТИРОВАННЫХ КОРЕНЕЗБИРАЛЬНИ МАШИНЫ

*Срезание ботвы, выкапывание и очистки корнеплодов от примесей зависит не только от конструкции и параметров рабочих органов коренезбиральнои машины, но и от агробиологических и физико-механических характеристик корнеплодов в период их уборки. Выбор конструкции рабочих органов и настройки параметров и режимов работы модуля для срезания ботвы, викопувальних и очистных модулей самоходных коренезбиральних комбайнов регламентированы размерным параметрам и форме корнеплодов и физико-механическим состоянием околоплодного почвенной среды. Полученные теоретические математические модели (1) и (2) и эмпирические зависимости (3) - (7) могут быть использованы для дальнейшей разработки и обоснования рациональных конструктивно-кинематических параметров рабочих органов адаптированных коренезбиральних машин. Приведены результаты экспериментальных исследований массы и толщины слоя налипшего грунта на поверхности тела выкопанных корнеплодов в зависимости от их размерных характеристик и физического состояния почвы. Установлено, что масса налипшего грунта изменяется в пределах от 10 ... 220 г для кормовой свеклы, 35 ... 290 г для сахарной свеклы, до 90 г для столовой свеклы, 65 г для моркови, 20 ... 360 г для корнеплодов цикория.*

**© Дубчак Н. А., Кирик О. М.**

УДК 621.81.004.67(075)
**Захарчук В.І., Захарчук О.В.**
Луцький національний технічний університет
**Галущак Д.О., Галущак О.О.**
Вінницький національний технічний університет

# МЕТОД ВИБОРУ ТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ

*Відновлення деталей автомобілів та інших машин дозволяє використати їх матеріал, форму і залишкову довговічність, що зменшує потребу запасних частин, праці, енергії та матеріалів, а також сприяє збереженню навколишнього середовища. Дослідженнями встановлено, що 85% деталей машин стають не роботоздатними при зношуваннях поверхонь не більше 0,2-0,3 мм, а собівартість їх відновлення складає 50-60% від ціни нової деталі. Зношені поверхні можуть бути відновлені, як правило, декількома способами. В залежності від величини зношування, матеріалу деталі та її термообробки запропонований метод вибору раціональної технології відновлення зношеної поверхні в залежності від технологічних можливостей виробництва, умов експлуатації, собівартості відновлення, залежності вартості відновлення від довговічності роботи. Оцінка цих чинників виконується послідовно за технологічним, ресурсним та економічним критеріями. Остаточне рішення щодо вибору технології відновлення приймається на конкретному виробництві з врахуванням його технічних та фінансових можливостей.*

**Ключові слова:** *деталь, відновлення, технологія, метод, поверхня, роботоздатність*

**Вступ**. Технологічний процес ремонту автомобілів значно складніший за процес їх виготовлення, так як включає в себе процеси машинобудівного виробництва, а також процеси, специфічні для ремонту: очищення, мийку, розбирання, дефектування та відновлення.

Вибір раціональної технології відновлення залежить від конструктивно-технологічних особливостей деталі, умов її роботи та зношування, а також від вартості відновлення. Вибір технології відновлення деталі має багато спільного з вибором найкращої доступної технології виробництва.

Термін «найкраща доступна технологія» (best available techniques — BAT) вперше з`явився у директиві робочої групи по атмосферному повітрю (Air Framework Directive — AFD) у 1984 р. Найкраща доступна технологія (НДТ) – технологія виробництва продукції (товарів), виконання робіт, надання послуг, що визначається на основі сучасних досягнень науки і техніки і найкращого поєднання критеріїв досягнення цілей охорони навколишнього середовища за умови наявності технічної можливості та економічної доцільності її застосування. В країнах пострадянського простору, зокрема РФ, були окремі спроби виконання досліджень щодо впровадження НДТ в хімічній промисловості [1].

У Європейському союзі діють 33 довідники ЄС по НДТ для різних галузей промисловості, що враховують всі технологічні особливості та апаратне оснащення процесів з урахуванням екологічних впливів і економічних витрат. Однак, пряме використання європейських довідників НДТ на вітчизняних підприємствах є навряд чи можливим, зважаючи на наявні відмінності, в тому числі специфік всіх видів ресурсів, особливостей сировини, доступності різних видів енергії, природних умов, екологічних характеристик територій і технологічної культури виробництва.

**Огляд та аналіз попередніх досліджень**. Використання системного підходу і можливостей інформаційних технологій є необхідною умовою вирішення проблеми вибору раціональної технології з огляду на її складність і багатоаспектність. Значний внесок у розвиток системного аналізу та теорій прийняття рішень внесли: Е. С. Вентцель [1], В. Н. Волкова, А.А.Денисов [2], А. В. Костров [3], О. И. Леричев [4], С. Оптнер [5], Ф. И. Перегудов [6], В. В. Подиновский [7], Д. А. Поспелов [8].

Завдання вибору технології або конкретного способу відновлення деталі вперше було розв’язане В.А. Шадрічевим [9], а потім в цей метод внесли доповнення інші автори [10, 11, 12]. Відомі три основні методи вибору способу відновлення деталі. Перший ґрунтується на розрахунку вартості відновлення деталі і порівнянні її з ціною нової деталі. За другим методом порівнюють між собою комплексні величини у вигляді відношень вартості і ціни до ресурсу нової і відновленої деталі. Третій метод враховує вартість і довговічність нової і відновленої

© **Захарчук В.І., Захарчук О.В., Галущак Д.О., Галущак О.О.**

деталі. Недоліки першого методу полягають у відсутності врахування технічного стану і післяремонтного напрацювання відновленої деталі. Другий і третій методи допускають в виробництво способи, які при малій вартості відновлення формують і малу довговічність деталі у порівнянні з нормативним напрацюванням агрегату. Тому метою даної роботи є розробка методу, який не має цих недоліків та який враховує методи системного аналізу та теорії прийняття рішень.

**Виклад основного матеріалу.** Після аналізу чинників, які впливають на вибір способу відновлення автомобільних деталей пропонується наступна схема вибору способу відновлення деталі (рис. 1). При цьому методом апріорного ранжування були відсіяні менш суттєві чинники.

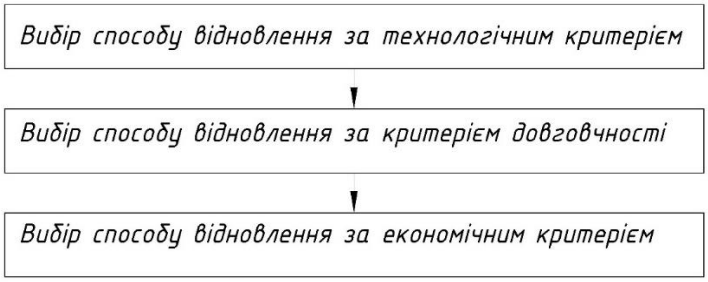



Рисунок 1 – Схема вибору способу відновлення деталі

Технологічний критерій враховує, з однієї сторони, особливості відновлюваної деталі, а з другої сторони – технологічні можливості відповідних способів відновлення. Крім того враховуються технологічні можливості ремонтного підприємства [11]. Принципова можливість застосування деяких найбільш поширених способів наведена в табл. 1.

Таблиця 1

Принципова можливість застосування деяких найбільш поширених способів відновлення деталей

| Спосіб відновлення | Вихідні характеристики відновлення деталей | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Види металів і сплавів, по відношенню до яких застосовується спосіб | Види поверхонь, по відношенню до яких застосовується спосіб | Мінімальний зовнішній діаметр поверхні, мм | Мінімальний внутрішній діаметр поверхні, мм | Мінімальна товщина покриття яке наноситься, мм | Максимальна товщина покриття яке наноситься, мм | Можливість застосування до деталей, які отримують знакозмінні навантаження |
| Наплавлення в середовищі $CO_2$ | Сталь | 1*; 3* | 15 | - | 0,5 | 3,5 | + |
| Наплавлення під шаром флюсу | | | 50 | - | 1,5 | 5 | |
| Вібродугова наплавка | | | 15 | - | 0,5 | 3 | - |
| Металізація | Всі метали | | 30 | - | 0,3 | 3 | |
| Газополум'яне напилення | | | 30 | - | 0,3 | 1,5 | |
| Плазменне напилення або наплавка | | | 30 | - | 0,3 | 3 | + |
| Хромування | Сталь, чавун | 1*; 2* | 5 | 40 | 0,05 | 0,3 | |
| Насталювання | | | 12 | 40 | 0,1 | 1,5 | |
| Електроконтактне приварювання металевого шару | Всі метали | | 10 | 60 | 0,1 | 1,5 | |

© Захарчук В.І., Захарчук О.В., Галущак Д.О., Галущак О.О.

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ручна наплавка | | 1*; 2*; 3* | 10 | 40 | 1 | 6 | |
| Електромеханічна обробка | Сталь | 1* | 30 | - | 0,05 | 0,12 | |
| Відновлення під ремонтний розмір | Всі метали | 1*; 2*; 3* | Визначаються за умовами міцності деталей | | - | - | |
| Встановлення додаткових ремонтних деталей | | | | | - | - | |
| Пластичне деформування | Сталь | | | | - | - | |
| *1 – зовнішні циліндричні поверхні;<br>*2 – внутрішні циліндричні поверхні;<br>*3 – плоскі поверхні | | | | | | | |

На основі технологічних характеристик вибираємо 4-5 можливих способи відновлення різних поверхонь деталі.

Для подальшого скорочення кількості можливих способів відновлення пропонується використати критерій довговічності Кд відновлюваної деталі:

$$К_Д = К_з\ К_в\ К_{зч} К_р\ , \quad (1)$$

де $К_з$ – коефіцієнт зносостійкості відновленої поверхні;

$К_в$ – коефіцієнт витривалості відновленої деталі;

$К_{зч}$ – коефіцієнт зчеплення ремонтного матеріалу з відновлюваною поверхнею;

$К_р$ – поправочний коефіцієнт, який враховує фактичну роботоздатність відновленої деталі в умовах експлуатації.

Приблизні значення коефіцієнтів, які визначають довговічність відновлених деталей наведені в табл. 2. При їх визначенні враховані підходи, започатковані в роботах [12, 13].

Таблиця 2 – Значення коефіцієнтів, які визначають довговічність відновлених деталей

| Способи відновлення | Кз | Кв | Кзч | Кр |
|---|---|---|---|---|
| Наплавлення в середовищі $CO_2$ | 0,95 | 0,95 | 1,00 | 0,82 |
| Вібродугова наплавка | 0,95 | 0,62 | 1,00 | 0,82 |
| Наплавлення під шаром флюсу | 1,10 | 0,82 | 1,00 | 0,86 |
| Металізація | 1,15 | 0,80 | 0,70 | 0,80 |
| Газополум'яне напилення | 1,15 | 0,80 | 0,70 | 0,80 |
| Плазменне напилення | 1,25 | 0,85 | 0,75 | 0,80 |
| Хромування | 1,15 | 0,85 | 0,70 | 0,90 |
| Насталювання | 1,10 | 0,80 | 0,70 | 0,80 |
| Електроконтактне приварювання металевого шару | 1,00 | 0,80 | 0,85 | 0,80 |
| Ручна наплавка | 1,00 | 0,80 | 1,00 | 0,80 |
| Епоксидні композиції | 0,90 | 0,80 | 1,00 | 0,85 |
| Електромеханічна обробка | 1,00 | 1,20 | 1,00 | 0,90 |
| Обробка під ремонтний розмір | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,88 |
| Встановлення додаткових ремонтних деталей | 1,00 | 0,80 | 1,00 | 0,86 |
| Пластичне деформування | 0,90 | 1,00 | 1,00 | 0,90 |

З декількох варіантів способу відновлення поверхні деталі раціональним за критерієм довговічності (ресурсносності) буде той, в якого він має максимальне значення.

Найбільш раціональний спосіб відновлення вибираємо за економічним критерієм:

$$K_{Ei} = \frac{С_{Bi}}{К_{Дi}} \rightarrow min\ , \quad (2)$$

де $K_{Ei}$ – економічний критерій і-го способу;

$C_{Bi}$ – витрати на відновлення поверхні деталі і-тим способом, грн.;

$К_{Дi}$ – коефіцієнт довговічності відновленої поверхні і-тим способом.

Витрати на відновлення деталі:

$$C_{Bi} = C_{Пi} \cdot S \cdot К_{інф.} \quad (3)$$

де $C_{Пi}$ – питома собівартість відновлення одиниці площини зношеної поверхні і-тим способом, грн/см$^2$;

S – площа поверхні, яка відновлюється, см$^2$;

$К_{інф}$ – коефіцієнт річної інфляції, який враховує зміни питомої собівартості відновлення поверхні у зв'язку з рівнем інфляції.

Питомі собівартості відновлення зношених поверхонь деталей найбільш відомими способами [13] показані в табл. 3.

Таблиця 3

Питомі собівартості відновлення зношених поверхонь деталей найбільш відомими способами

| Спосіб відновлення | Питома собівартість відновлення $C_{Пi}$, грн/см$^2$ |
|---|---|
| Наплавлення в середовищі $CO_2$ | 2,4-3,2 |
| Вібродугове наплавлення | 3,2-4 |
| Наплавлення під шаром флюсу | 4,8-5,6 |
| Дугова металізація | 3,2-4,8 |
| Газополомуневе напилення | 3,2-4,8 |
| Плазменне напилення | 4-5,6 |
| Хромування електролітичне | 1,6-3,6 |
| Насталювання електролітичне | 1-4 |
| Контактна наплавлення металічного шару | 3,4-4,8 |
| Ручна наплавка | 1,6-2,4 |
| Епоксидні композиції | 1,2-2,4 |
| Електромеханічна обробка | 3,2-3,6 |
| Обробка під ремонтний розмір | 0,4-0,8 |
| Встановлення додаткових деталей | 1,6-4 |
| Пластичне деформування | 0,4-0,8 |

В процесі експлуатації техніки по мірі збільшення напрацювання її деталі втрачають роботоздатність, що вимагає їх заміни або відновлення. Але в умовах обмежених фінансових і матеріальних ресурсів вирішити цю проблему вигідніше все-таки за рахунок ремонту деталей. При відновленні деталей витрати на матеріали і заготівельні роботи мінімальні, так як в якості заготовок слугують зношені деталі. Разом з тим сучасні технології дозволяють отримати ресурс відновленої деталі на рівні нової і навіть вищий.

**Висновки.** Відновлення багатьох деталей автомобіля є доцільним та економічно вигідним. Це стосується, в першу чергу, базових та дорого вартісних деталей. Зношені поверхні можуть бути відновлені, як правило, декількома способами. Запропонований метод дозволяє вибрати з числа можливих найбільш раціональний спосіб відновлення деталі для забезпечення найкращих техніко-економічних показників в кожному конкретному випадку в залежності від конструктивних особливостей деталі та програми виробництва.

**Інформаційні джерела**

1. Тишаева И.Р. Алгоритмическое обеспечение систем поддержки принятия решения по выбору наилучшей доступной технологии в химическом производстве: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук. Москва, 2014. – С. 20.

2. Волкова В.Н., Денисов А.А. Основы теории систем и системного анализа. Санкт-Петербург, 1999. – С. 510.

3. Костров А.В. Системный анализ и принятие решений. Владимир, 1995. – С. 68.

4. Ларичев О.И. Теория принятия решений. Москва, 2000. – С. 294.

5. Оптнер С. Системный анализ для решения деловых и промышленных проблем. Москва, 1969. – С. 69.

**© Захарчук В.І., Захарчук О.В., Галущак Д.О., Галущак О.О.**

6. Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ. Москва, 1989. – С. 320.

7. Подиновский В.В. Введение в теорию важности критериев в многокритериальных задачах принятия решений. Москва, 2007. – С. 64.

8. Поспелов Д.А. Ситуационное управление: теория и практика. Москва, 1986. – С. 288.

9. Шадричев В.А. Основы выбора рационального способа восстановления автомобильных деталей металлопокрытиями / В.А. Шадричев. М.; Л.: Машгиз, 1962. – 296 с.

10. Батищев А.Н. Методика обоснования рационального способа восстановления изношенных деталей / А.Н. Батищев // Современное оборудование и технологические процессы для восстановления и упрочнения деталей машин: тез. докл. науч.-техн. конф. стран членов СЭВ «Ремдеталь-88», г. Пятигорск. М., 1988. Ч.1. С. 23-24.

11. Васильев Н.Г. Выбор способа восстановления изношенных деталей / Н.Г. Васильев, И.И. Галиев, Т.Н. Васильева // Сварочное производство. 1996. №7. С. 13-15.

12. Иванов В.П. Выбор способа восстановления деталей / В.П. Иванов // Наука и техника. 2016. Т.15, №1. С.9-17.

13. Чеботарев М.И. Выбор оптимального способа восстановления изношенной поверхности детали / М.И. Чеботарев, М.Р. Кадыров. – Краснодар: КубГАУ, 2016. – 91 с.

**Захарчук В.І., Захарчук О.В.**
Луцкий национальный технический университет
**Галущак О.О., Галущак Д.О.**
Винницкий национальный технический университет

## МЕТОД ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ

Восстановление деталей автомобилей и других машин позволяет использовать их материал, форму и остаточную долговечность, что уменьшает потребность запасных частей, труда, энергии ы материалов, а также содействует сохранению окружающей среды. Исследованиями установлено, что 85% деталей машин становятся неработоспособными при износах поверхностей не больше 0,2-0,3 мм, а себестоимость их восстановления составляет 50-60% от цены новой детали. Изношенные поверхности могут быть восстановлены, как правило, несколькими способами. В зависимости от величины износа, материала детали и термообработки предложен метод выбора рациональной технологии восстановления изношенной поверхности в зависимости от технологических возможностей производства, условий эксплуатации, себестоимости восстановления, зависимости стоимости восстановления от долговечности работы. Оценки этих факторов производится последовательно за технологическим, ресурсным и экономическим критериями. Окончательное решение касательно выбора технологии восстановления принимается на конкретном производстве с использованием его технических и финансовых возможностей.

**Ключевые слова:** деталь, восстановление, технология, метод, поверхность, работоспособность

**Zakharchuk V.I., Zakharchuk O.V.**
Lutsk National Technical University
**Galushchak O.O., Galushchak D.O.**
Vinnytsia National Technical University

## METHOD FOR SELECTING PARTS RECOVERY TECHNOLOGY

Remanufacturing of parts allows the use of their material, shape and residual durability, which reduces the need for spare parts, labor, energy and materials, and also helps to preserve the environment. Research has established that 85% of machine parts become inoperative when surfaces wear no more than 0.2-0.3 mm, and the cost of their restoration is 50-60% of the price of a new part. Worn surfaces can be repaired, as a rule, in several ways. Depending on the amount of wear, the material of the part and heat treatment, a method is proposed for choosing a rational technology for restoring a worn surface, depending on the technological capabilities of production, operating conditions, the cost of restoration, the dependence of the cost of restoration on the durability of work. These factors are assessed sequentially according to technological, resource and economic criteria. The final decision regarding the choice of recovery technology is made at a specific production facility using its technical and financial capabilities.

**Key words:** detail, restoration, technology, method, surface, performance

© **Захарчук В.І., Захарчук О.В., Галущак Д.О., Галущак О.О.**

УДК 631.319.06
**Клендій М.Б., Драган А.П.**
ВП НУБіП України «Бережанський агротехнічний інститут»

# ОБГРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ РОБОЧОГО ОРГАНА ГВИНТОВОЇ СЕКЦІЇ КОМБІНОВАНОГО ҐРУНТООБРОБНОГО ЗНАРЯДДЯ

*У статті проведено аналіз робочих органів комбінованих ґрунтообробних машин та надано рекомендації щодо побудови компонувальної схеми. Обґрунтовано конструкцію гелікоїдального робочого органу для поверхневого обробітку ґрунту поверхня якого буде відрізнятися від іншої широко відомої гвинтової лінійчатої поверхні – гвинтового коноїда. Наведено параметричні рівняння розгорнутого гелікоїда з горизонтальною віссю обертання. Складено диференціальні рівняння руху частинки поверхнею гелікоїда, і на їх основі отримано траєкторії руху частинок ґрунту поверхнею гелікоїда. Незалежно від точки вступу частинки на поверхню, вона ковзає по ній, наближаючись при цьому до внутрішньої периферії поверхні, тобто до циліндричного вала. При збільшенні швидкості руху агрегату це наближення зростає. Запропоновано конструкцію робочого органу з решітчастим валом який буде додатково виконувати функцію котка.*

**Ключові слова:** *комбіноване ґрунтообробне знаряддя, гвинтовий робочий орган, гелікоїд.*

**Постановка проблеми.** У сучасному землеробстві обробка ґрунту є важливим технологічним процесом. Протягом багатьох років з'являлися різноманітні прийоми механічного впливу на ґрунт з метою підвищення його родючості, за рахунок створення кращих умов для розвитку і зростання вирощуваних культур. На всій території України активно використовують поверхневий обробіток ґрунту. Одним із сучасних прийомів обробітку є використання комбінованої ґрунтообробної техніки, що має найчастіше дискові робочі органи, гвинтові робочі органи і різні види лап (односторонні плоскорізні, стрілчасті плоскорізні, універсальні, розпушувальні долотоподібні і т.д.), які забезпечують обробіток поверхні ґрунту на різну глибину, а повністю завершують весь процес як правило котки (клиновидні, ребристі, зубчасті, кільчасто-шпорові і т.д.). Але незважаючи на великий вибір робочих органів, які можуть бути встановлені на комбінованій бороні досягнути задовільної якості обробітку ґрунту не завжди можливо, тому розробка нових прогресивних робочих органів є актуальним завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питанням, що пов’язані з процесом проектування та функціонування комбінованих ґрунтообробних знарядь присвячені роботи ряду авторів [1-3, 7, 8], однак, фактично всі існуючі конструкції комбінованих ґрунтообробних знарядь мають недоліки.

**Постановка завдання.** Метою дослідження є обґрунтування конструкції гелікоїдального робочого органу гвинтової секції комбінованого ґрунтообробного знаряддя.

**Викладення основного матеріалу.** Кріплення дисків в сучасних машинах найчастіше виконано за допомогою гумових елементів (демпферів), які вперше з'явилися у фірми Väderstad. Приблизно такий же принцип дії у листових ресор, встановлених на боронах Heliodor від фірми Lemken [3]. Проте ресори і гумові демпфери не повністю компенсують бічне зміщення встановлених під кутом дисків і гвинтових робочих органів. Для компенсації бічного зсуву встановлюють два ряди дисків з нахилом в протилежну сторону, а для гвинтових робочих органів використовують робочі органи з правим і лівим навиванням гвинтової поверхні [4,5,6]. Конструктивні параметри диска або гвинтового робочого органу перебувають в певній залежності. З однієї сторони бажано зменшувати діаметр $D$ робочого органу для кращого його входження в ґрунт, також одночасно зменшувати радіус $R$ сфери, або збільшувати кут нахилу твірних гвинтової поверхні для кращого перевертання ґрунту і змішування його із рослинними рештками, однак це може призвести до того, що поверхня фаски буде зминати ґрунт і перешкоджатиме зануренню робочого органу. Щоб цього не відбулося, кут $\delta$ заточки потрібно взяти такий, щоб він забезпечував наявність так званого тильного кута в зоні роботи робочого органа, тобто кут $\delta$ потрібно брати по можливості найменшим. Проте його зменшувати можна до певної межі, тому що при цьому зменшується кут загострення $i$, який не може бути менший граничної величини (кут загострення $i$ приймають в межах $12^0...25^0$). Кути $\alpha$ і $\beta$ установки робочого органа теж впливають на визначення кута $\delta$ заточки при заданому тильному куту

**© Клендій М.Б., Драган А.П.**

(*3°...5°*), який запобігає зминанню ґрунту поверхнею фаски подібно тому, як відбувається зминання ґрунту тильною поверхнею робочого органа при неналежних кутах його установки.

Також, для підготовки насіннєвого ложа, наприклад, після зяблевої оранки, на деяких знаряддях перед першим рядом дисків або гвинтових робочих органів встановлюють вирівнювальну планку.

Стрілчасті лапи також є одним з основних робочих органів, які входять до складу комбінованих машин для обробки ґрунту. Ширина лап і їх кількість визначають інтенсивність роботи машини і розмір грудок. Широкі лапи і великий крок їх сліду залишають за собою великі земляні грудки, які можна розбити, лише доклавши чимало зусиль [7,8]. Робочі глибина і ширина лап дуже тісно взаємопов'язані між собою. Чим важчий грунт, тим більшою повинна бути робоча глибина і менший крок сліду лап, і вужчою сама лапа. Форма, ширина і робоча глибина впливають на результат роботи, витрата палива і спрацювання матеріалу. Універсальні стрілчасті лапи добре зарекомендували себе під час обробітку ґрунту на глибину від 6 до 14 см.

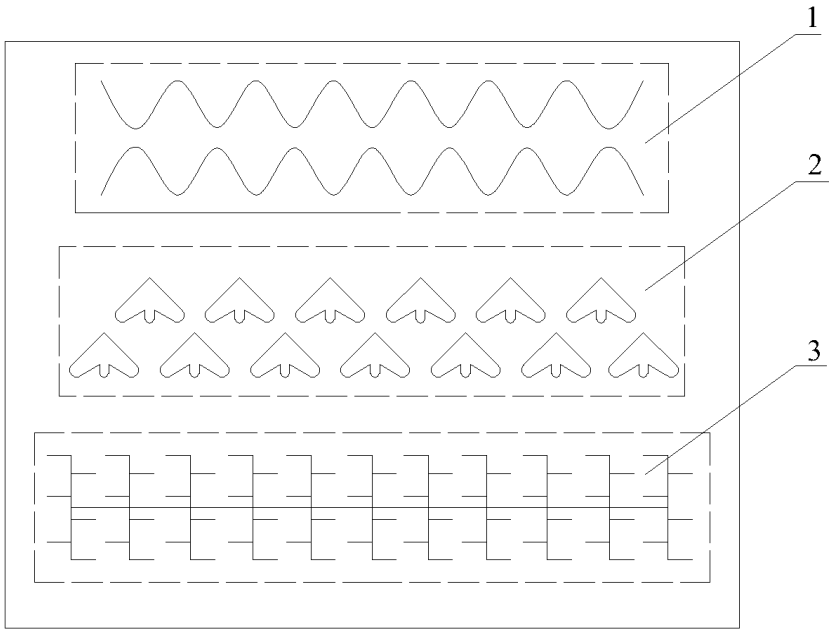



Рис. 1. Основні модулі комбінованого грунтообробного знаряддя:
1 - модуль з дисковими або гвинтовими робочими органами;
2 - розрихлююча секція; 3 - ущільнювально-вирівнюючий модуль.

Як правило, процес обробітку ґрунту комбінованим ґрунтообробним агрегатом завершується ущільненням ґрунту і руйнуванням великих ґрунтових грудок. Ці операції виконуються прикочуючими робочими органами. Котки вирівнюють ґрунтову поверхню, яка забезпечує кращу рівномірність сходів насіння, руйнують ґрунтові грудки і ґрунтову кірку, ущільнюють поверхневий шар. Дані технологічні операції виконуються котками різного конструктивного виконання, що дозволяє одну з перерахованих операцій виконати краще за інших і визначає застосування котків певного типу.

Гелікоїдальний робочий орган для поверхневого обробітку ґрунту пропонується виготовляти у вигляді розгорнутого гелікоїда, поверхня якого буде відрізнятися від іншої широко відомої гвинтової лінійчатої поверхні – гвинтового коноїда (шнека). Якщо у шнека прямолінійні твірні поверхні перпендикулярні його осі, то у розгорнутого гелікоїда вони складають із віссю певний кут. Конструктивними параметрами робочої поверхні є радіус $r$ внутрішньої кромки, радіус $R$ зовнішньої (ріжучої) кромки, крок $H$, кут нахилу прямолінійних твірних. Зовнішня і внутрішня кромки є гвинтовими лініями із кутами підйому $\varphi_R$ і $\varphi_r$. Кут нахилу $\varphi$ прямолінійних твірних поверхні визначається кутом підйому гвинтової лінії мінімально можливого радіуса $p$, яка носить назву ребра звороту. Саме наявність кута нахилу

прямолінійних твірних сприяє зануренню поверхні у ґрунт, якщо її вісь розташувати горизонтально і під кутом $\beta$ до напряму, перпендикулярному напряму $V$ руху агрегату.

Параметричні рівняння розгорнутого гелікоїда з горизонтальною віссю обертання, паралельною осі $OX$, мають наступний вигляд:

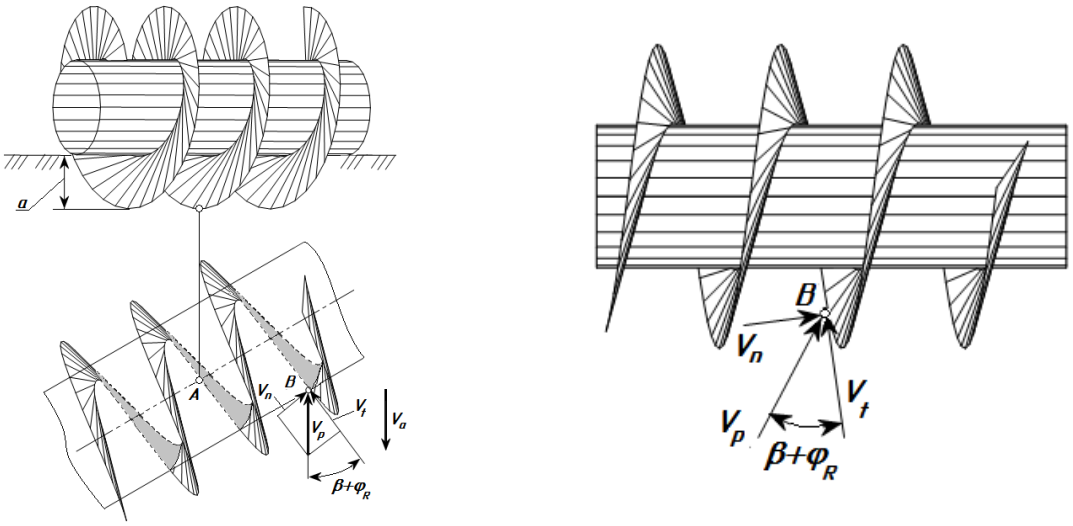
$$\begin{aligned} X &= h\alpha - u\sin\varphi; \\ Y &= p\sin\alpha - u\cos\varphi\cos\alpha; \\ Z &= p\cos\alpha + u\cos\varphi\sin\alpha, \end{aligned} \qquad (1)$$

де $\alpha$, $u$ – змінні параметри поверхні, причому $\alpha$ – кут повороту точки навколо осі поверхні при її русі до поточної точки на гвинтовій лінії, яка розташована на циліндрі радіуса $p$; $u$ – довжина прямолінійної твірної від поточної точки на гвинтовій лінії до точки на поверхні;

$h$ – стала величина (гвинтовий параметр), через якого визначається крок поверхні – $H=2\pi h$;

$\varphi$ – кут нахилу прямолінійних твірних гелікоїда, який можна знайти через сталі величини $h$ і $p$: $\cos\varphi = p/\sqrt{p^2+h^2}$ .

Розглянемо поверхню робочого органу, повернуту під кутом атаки $\gamma=\beta+\varphi_R$ відносно напрямку руху агрегату $V_a$ (рис. 2,а). Її нижня частина в межах глибини обробітку $a$ буде знаходитися в ґрунті. На горизонтальній проекції ця частина поверхні обмежена прямими, паралельними осі, і зображена штриховими лініями. Найнижча точка $A$ поверхні (ріжучої крайки) має контакт із ґрунтом на дні борозни. Точка $B$ крайки має контакт із ґрунтом на поверхні поля. Якщо агрегат рухається із швидкістю $V_a$, то із такою ж швидкістю $V_p$ частинка ґрунту вступає на робочу поверхню гелікоїда. Цю швидкість можна розкласти на дві взаємно перпендикулярні складові: $V_t=V_p\cdot\cos(\beta+\varphi_R)$ і $V_n=V_p\cdot\sin(\beta+\varphi_R)$. Кут атаки $\gamma=\beta+\varphi_R$ для гелікоїда є змінним і залежним від глибини положення точки ріжучої крайки в ґрунті. Це зумовлено змінним значенням кута $\varphi_R$. Межі зміни цього кута є відносно незначними $\varphi_R\ldots\varphi_r$, тому ми приймемо його сталим і рівним в найнижчій точці ріжучої крайки: $\varphi_R=\text{arctg}(h/R)=\text{arctg}(A\sin\varphi/R)$.




а б

Рис. 2. Графічні ілюстрації до розкладання швидкості $V_p$ частинки, яка вступає на поверхню гелікоїда, на складові $V_t$ і $V_n$:
а) гелікоїд повернуто на кут $\beta$;
б) гелікоїд разом із векторами повернуто в зворотному прядку на кут $(-\beta)$

Для спрощення розрахунків ми гелікоїд не повертатимемо на кут $\beta$, а вважатимемо, що на нього насувається ґрунт із швидкістю $V_p$ при $\beta=0$ (рис. 2,б). Така модель дозволить спрощено описати поверхню гелікоїда без повороту його на кут $\beta$, замінивши поворот гелікоїда на поворот вектора швидкості агрегату. Іншими словами, гелікоїд разом із позначеними векторами (рис. 2,а) повернемо в зворотну сторону на кут $(-\beta)$. Це дає можливість використовувати параметричні рівняння (1) гелікоїда, не ускладнюючи їх поворотом на кут $\beta$.

З поперечною швидкістю $V_n$ частинка вступає на поверхню гелікоїда, а від поздовжньої $V_t$ залежить кутова швидкість його обертання. Будемо виходити із умови, що ріжуча крайка

гелікоїда перекочується по дну борозни в напрямі руху агрегату без ковзання, тому з певним допущенням можна записати $V_t=R\omega$, де $\omega$ – кутова швидкість обертання гелікоїда. Цей вираз не є точним, оскільки ріжучою крайкою є гвинтова лінія, а не коло, але будемо вважати, що він прийнятний для практики. Звідси знаходимо $\omega$:

$$\omega=V_p\cdot\cos(\beta+\varphi_R)/R=V_p\cdot\cos[\beta+\text{arctg}(A\sin\varphi/R)]/R. \quad (2)$$

Величину поперечної швидкості $V_n$, так як і кутову швидкість $\omega$ обертання гелікоїда, будемо враховувати при чисельному інтегруванні диференціальних рівнянь відносного руху частинки по його поверхні.

Розпишемо векторне рівняння $m\overline{w}=\overline{F}$ в проекціях на осі системи координат, взявши до уваги, що сила тертя $fN$ спрямована вздовж одиничного вектора в протилежну до нього сторону:

$$\begin{aligned}
mx'' &= -N\cos\varphi - fN\frac{(A\alpha'-u')}{\sqrt{(A\alpha'-u')^2+u^2\alpha'^2\cos^2\varphi}}\sin\varphi;\\
my'' &= N\sin\varphi\cos\alpha -\\
&+ fN\frac{u\alpha'\sin(\omega t-\alpha)+(u'-A\alpha')\cos(\omega t-\alpha)}{\sqrt{(A\alpha'-u')^2+u^2\alpha'^2\cos^2\varphi}}\cos\varphi;\\
mz'' &= -mg+N\sin\varphi\sin(\omega t-\alpha)-\\
&- fN\frac{u\alpha'\cos(\omega t-\alpha)-(u'-A\alpha')\sin(\omega t-\alpha)}{\sqrt{(A\alpha'-u')^2+u^2\alpha'^2\cos^2\varphi}}\cos\varphi.
\end{aligned} \quad (3)$$

Після спрощень отримаємо:

$$\begin{aligned}
\alpha'' &= \frac{(2u'+A(\omega-\alpha'))(\omega-\alpha')\cos\varphi-g\cos(wt-\alpha)}{u\cos\varphi}-\\
&- f\alpha'\sin\varphi\frac{u(\omega-\alpha')^2\cos\varphi+g\sin(wt-\alpha)}{\sqrt{(A\alpha'-u')^2+u^2\alpha'^2\cos^2\varphi}}\\
u'' &= g\cos\varphi\sin(wt-\alpha)-fu'\sin\varphi\frac{u(\omega-\alpha')^2\cos\varphi+g\sin(wt-\alpha)}{\sqrt{(A\alpha'-u')^2+u^2\alpha'^2\cos^2\varphi}}+\\
&+\frac{2Au'(\omega-\alpha')\cos\varphi-Ag\cos(wt-\alpha)+(\omega-\alpha')^2(A^2+u^2\cos^2\varphi)\cos\varphi}{u\cos\varphi};\\
N &= m\sin\varphi\left[u(\omega-\alpha')^2\cos\varphi+g\sin(wt-\alpha)\right].
\end{aligned} \quad (4)$$

Вирази (4) потрібно розглядати як систему двох перших рівнянь. Третє рівняння – реакція поверхні – стає відомим після розв'язання системи двох перших рівнянь. Її потрібно розв'язувати чисельними методами.

Система перших двох рівнянь (4) була розв'язана чисельними методами в середовищі «*Simulink*» програмного продукту «*MatLab*». Було прийнято умову, що гелікоїд, конструктивні параметри якого наведені раніше, рухається із швидкістю $V_a=9$ *км/год* ($V_a=V_p=2{,}5$ *м/с*). Кут установки $\beta=40°$, коефіцієнт тертя $f=0{,}3$. На основі цього знаходимо: $V_t=V_p\cdot\cos(\beta+\varphi_R)=1{,}62$ *м/с*; $V_n=V_p\cdot\sin(\beta+\varphi_R)=1{,}9$ *м/с*. Отже, $\omega=V_t/R=6{,}5\ c^{-1}$.

Початкові умови інтегрування вибираються виходячи із того, в якій точці ріжучої крайки частинка вступає на поверхню. Цю точку можна вибирати в межах глибини $a$ занурення поверхні у ґрунт і вона задається початковими координатами $u_o$ і $\alpha_o$. Для ріжучої крайки $u_o=0{,}276$ *м*. Для знаходження значення змінної $\alpha_o$ потрібно відносно неї розв'язати останнє рівняння (1):

$$\alpha_0=-\text{Arccos}\frac{Az+u\sqrt{(A^2+u^2)\cos^2\varphi-z^2}}{(A^2+u^2)\cos^2\varphi} \quad (5)$$

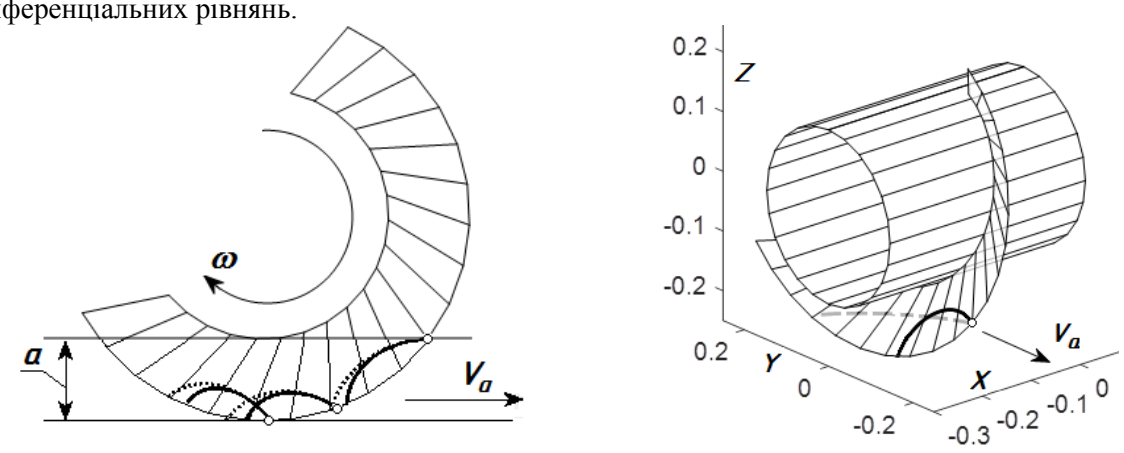
Поверхні поля відповідає значення $z=-0{,}15$ *м*, а дну борозни – $z=-0{,}25$ *м*. Підстановка цих значень дає $\alpha_o=-0{,}94$ і $\alpha_o=-1{,}83$. Отже, початкове значення $u_o$ при інтегруванні буде $u_o=0{,}276$ *м*, а початкове значення $\alpha_o$ буде залежати від глибини знаходження точки ріжучої крайки у ґрунті. Для поверхні ґрунту $\alpha_o=-0{,}94$, для дна борозни $\alpha_o=-1{,}83$. Інші значення $\alpha_o$ із даного проміжку відповідатимуть певній глибині знаходження точки ріжучої крайки у ґрунті. Вибираючи параметр $\alpha_o$ із зазначених меж, ми вибираємо точку на лезі на різній глибині занурення.

© Клендій М.Б., Драган А.П.

Початковим значенням перших похідних $u_o'$ і $\alpha_o'$ визначається напрям вступу частинки на поверхню гелікоїда.

Похідна $\alpha_o'$ означає кутову швидкість ковзання частинки в момент її вступу на лезо. Якби гелікоїд обертався, а частинка залишалася на місці, то швидкість ковзання по лезу була б сталою, протилежною напряму обертання гелікоїда і рівною $\alpha_o'=-\omega$. Однак це відбувається тільки на момент вступу частинки на лезо, а далі частинка захоплюється поверхнею, рухається по ній і кутова швидкість ковзання зменшується.

Похідна $u_o'$ означає лінійну швидкість руху частинки по поверхні вздовж координатної лінії (прямолінійної твірної) *u*. Лінійна швидкість $u_o'$ вздовж прямолінійної твірної поверхні залежить від складової $V_n$, яка в нашому випадку рівна *1,9 м/с*. Однак напрям складової $V_n$ не збігається із напрямом прямолінійної твірної. Крім того, при обертанні гелікоїда виникає складова швидкості переміщення його точок вздовж осі обертання. Частинка поступає на поверхню із швидкістю $V_n$ і додатково поверхня внаслідок обертання «наїжджає» на частинку. З огляду на це, за початкове значення $u_o'$ ми приймемо значення $u_o'=V_n=-1,9$ *м/с* (знак «мінус» означає, що частинка рухається вздовж прямолінійної твірної поверхні в протилежну сторону її відліку), а потім дослідимо закономірність ковзання частинки при збільшенні цього значення. На рис. 3 наведені траєкторії руху частинки за результатами чисельного інтегрування диференціальних рівнянь.




а б

Рис. 3. Траєкторії руху частинки ґрунту по поверхні гелікоїда

На рис. 3,а гвинтова поверхня зображена таким чином, що її вісь проектується в точку. Траєкторії ковзання побудовані при вступі частинки на поверхню в трьох точках: на поверхні поля, на дні борозни і в проміжній точці. Суцільною лінією зображено рух окремої частинки ґрунту без взаємодії із іншими. Однак в реальному процесі відбувається її взаємодія із іншими частинками. Існують сили підпору суміжних частинок, які примушують частинку рухатися по поверхні. Можна припустити, що сила підпору долає силу тертя і в такому випадку можна прийняти коефіцієнт тертя *f* рівним нулеві. Штриховою лінією зображені відносні траєкторії частинок при *f=0*. Як видно із рис. 3,а, різниця між траєкторіями несуттєва.

Незалежно від точки вступу частинки на поверхню, вона ковзає по ній, наближаючись при цьому до внутрішньої периферії поверхні, тобто до циліндричного вала. При збільшенні швидкості руху агрегату це наближення зростає. Наприклад, на рис. 3,б швидкість вступу частинки на поверхню збільшили від $u_o'=-1,9$ *м/с* до $u_o'=-2,5$ *м/с*. Траєкторія ковзання ближче наблизилася до циліндричного вала. Гвинтова поверхня зображена напівпрозорою, для того, щоб було видно абсолютну траєкторію руху частинки, яка зображена штриховою лінією. Справа в тому, що вона не лежить на поверхні і розташована за її тильною стороною. Під час ковзання по поверхні частинка додатково відкидається назад за рахунок її повороту. Сума цих двох рухів утворює абсолютну траєкторію. Таким чином, частинки ґрунту на початку руху під час ковзання по поверхні наближаються до циліндричного вала. Якщо лезо знаходиться в ґрунті, то нижні частинки тиснуть на верхні і циліндричний вал стає перепоною для їх руху. В області примикання гвинтової поверхні до вала відбуватиметься залипання ґрунту. Щоб цьому запобігти, вал має бути решітчастим (рис. 4).

© Клендій М.Б., Драган А.П.

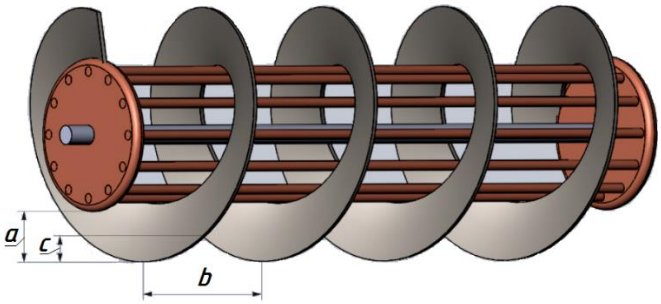



Рис. 4. Вигляд спереду на гелікоїд із решітчастим валом (гвинтовий робочий орган)

Решітчастий вал буде додатково виконувати функцію котка.

**Висновки.** Під час проведення досліджень було отримано наступні основні результати:

– проведено аналіз робочих органів комбінованих грунтообробних машин та надано рекомендації щодо побудови компонувальної схеми;

– складено диференціальні рівняння руху частинки поверхнею гелікоїда, і на їх основі отримано траєкторії руху частинок ґрунту поверхнею гелікоїда;

– запропоновано конструкцію робочого органу з решітчастим валом який буде додатково виконувати функцію котка.

**Інформаційні джерела:**

1. Бартенев И.М. Влияние геометрических параметров универсального почвообрабатывающего орудия на его эффективность / И. М. Бартенев, И.В. Попов // Лесотехнический журнал – 2014. – Т. 4. № 2. – С. 197-203.

2. Бледных В.В. Устройство, расчет и проектирование почвообрабатывающих орудий/В.В. Бледных – Челябинск. ЧГАА, 2010, - 213с.

3. Макаренко А.Н. Зарубежная сельскохозяйственная техника / А.Н. Макаренко, И.В Мартынова, А.В. Мачкарин и др. - Учебное пособие для студентов направления подготовки 35.03.06 - «Агроинженерия», «Технические системы в агробизнесе», Белгородский ГАУ им. В.Я. Горина, 2015. - 200 с.

4. Клендій М.Б., Пилипака С.Ф. Патент на корисну модель. № 133362 / Борона з гвинтовими робочими органами. Україна. МПК (2019.01) A01B 25/00) № a 201702099 Заявл. 6.03.2017. Опубл. 10.03.2019. Бюл. № 7.

5. Пастушенко С.І., Клендій М.Б., Клендій М.І. Дослідження агротехнологічних показників якості обробітку ґрунту бороною з гвинтовими робочими органами. Науковий вісник ТДАТУ, 2020, Випуск 10,том 1, С. 1-12.

6. Клендій М.Б., Клендій М.І., Шатров Р.В. Вплив конструктивних і технологічних параметрів розроблених варіантів борони з гвинтовими робочими органами на ефективність заробляння рослинних решток. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. 2020, Vol. 11, No 4, 65-71.

7. Бартенев И.М. Культиватор для ухода за культурами на вырубках / И.М. Бартенев, М.Н. Лысыч, П.В. Захаров // Лесное хозяйство. – Москва, - 2011. – Вып. 1. С 45-46.

8. Бартенев И.М. Система машин для лесного хозяйства и защитного лесоразведения / И.М. Бартенев, М.В. Драпалюк, М.Л. Шабанов – Воронеж: ВГЛТА, - 2010, - 215 с.

**Клендий Н.Б., Драган А.П.**
ОП НУБиП Украины «Бережанский агротехнический институт»

## ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ РАБОЧЕГО ОРГАНА ВИНТОВОЙ СЕКЦИИ КОМБИНИРОВАННОГО ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩЕГО ОРУДИЯ

*В статье проведен анализ рабочих органов комбинированных почвообрабатывающих машин и даны рекомендации по построению компоновочной схемы. Обоснованно конструкцию геликоидального рабочего органа для поверхностной обработки почвы поверхность которого будет отличаться от другой широко известной винтовой линейчатой поверхности - винтового коноида. Приведены параметрические уравнения развернутого геликоида с горизонтальной осью вращения. Составлен дифференциальные уравнения движения частицы*

© Клендій М.Б., Драган А.П.

*поверхностью геликоида, и на их основании получены траектории движения частиц почвы поверхностью геликоида. Независимо от точки вступления частицы на поверхность, она скользит по ней, приближаясь при этом к внутренней периферии поверхности, то есть к цилиндрическому валу. При увеличении скорости движения агрегата приближение растет. Предложена конструкция рабочего органа с решетчатым валом который будет дополнительно выполнять функцию катка.*

**Ключевые слова:** *комбинированное почвообрабатывающее орудия, винтовой рабочий орган, геликоид.*

**Klendiy M.B., Drahan A.P.**
Separated Subdivision of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine «Berezhany agrotechnical institute»

## SUBSTANTIATION OF THE DESIGN OF THE WORKING BODY OF THE SCREW SECTION OF THE COMBINED TILLAGE TOOL

*The article analyzes the working organs of combined soil-cultivating machines and gives recommendations on the construction of the layout scheme. The design of the helical working body for surface tillage of the soil is substantiated, the surface of which will differ from another well-known helical ruled surface - the helical conoid. Parametric equations of an unfolded helicoid with a horizontal axis of rotation are given. Differential equations of motion of a particle by the surface of the helicoid are compiled, and on their basis the trajectories of motion of soil particles by the surface of the helicoid are obtained. Regardless of the point of entry of the particle onto the surface, it slides along it, while approaching the inner periphery of the surface, that is, to the cylindrical shaft. With an increase in the speed of the unit, the approximation increases. The design of a working body with a lattice shaft is proposed, which will additionally perform the function of a roller.*

**Key words:** *combined tillage tools, screw working body, helicoid.*

**© Клендій М.Б., Драган А.П.**

УДК 539.2:621.315.548.0:612.029.62
**[1]Криницький О.С., [2]Маковишин В.І., [1]Біліщук В.Б.**
[1] Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
[2] Івано-Франкіський національний медичний університет

# РОЗРОБКА ПРИСТРОЮ ДЛЯ ОЦІНКИ ПАРАМЕТРІВ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ

*В роботі представлено огляд методів і засобів вимірювання параметрів, які характеризують ефективність роботи термоелектричних генераторів. Двома найважливішими параметрами для оцінки ефективності роботи термоелектричних генераторів є ефективність перетворення та термоелектрична добротність. Попри нібито простоту методів вимірювання цих параметрів, їх практична реалізація пов'язана із значними труднощами, це призводить до утруднення оцінювання параметрів термоелектричних генераторів. В роботі запропонований простий, на думку автора, метод для оцінювання параметрів термоелектричних генераторів.*

**Ключові слова:** *термоелектричний генератор, електропровідність, термоелектрична добротність.*

**Вступ та постановка проблеми.** Термоелектричні явища ґрунтуються на перетворенні теплової енергії в електричну і навпаки. При роботі в якості генератора пристрої називаються термоелектричні генератори (ТЕГ). При роботі в режимі охолодження або нагрівання вони називаються термоелектричними охолоджувачами (ТЕО). Термоелектричні пристрої є твердотільними і здатні працювати без будь-яких проміжних рідин. Вони не мають рухомих частин, що знижує їх сприйнятливість до механічного руйнування під час довготривалого періоду роботи. Крім того, таке використання термоелектричних пристроїв дозволяє так звану «тиху роботу» з охолодження в порівнянні зі звичайними компресорними холодильними системами. Ці критерії роблять термоелектричні пристрої вельми привабливими для безлічі застосувань.

Для вироблення енергії термоелектричні пристрої використовуються в автомобілях в якості пристроїв рекуперації тепла вихлопних газів, де продувається теплова енергія вихлопних газів уздовж лінії вихлопу транспортного засобу і перетворюється в корисну електроенергію. Також їх використовують для дослідження космосу, для перетворення теплової енергії, що виділяється при розпаді радіоактивних ізотопів в електрику, сонячні термоелектричні станції захоплюють вхідне сонячне випромінювання і перетворюють сонячну теплову енергію в електричну.

Через їх здатність бути мініатюрними термоелектричні пристрої є придатними для регулювання температури обладнання, таких як хірургічні інструменти і волоконно-оптичні лазери в телекомунікаційних пристроях, також вони можуть бути вбудовані в мікропроцесори, щоб досягти точного контролю температури.

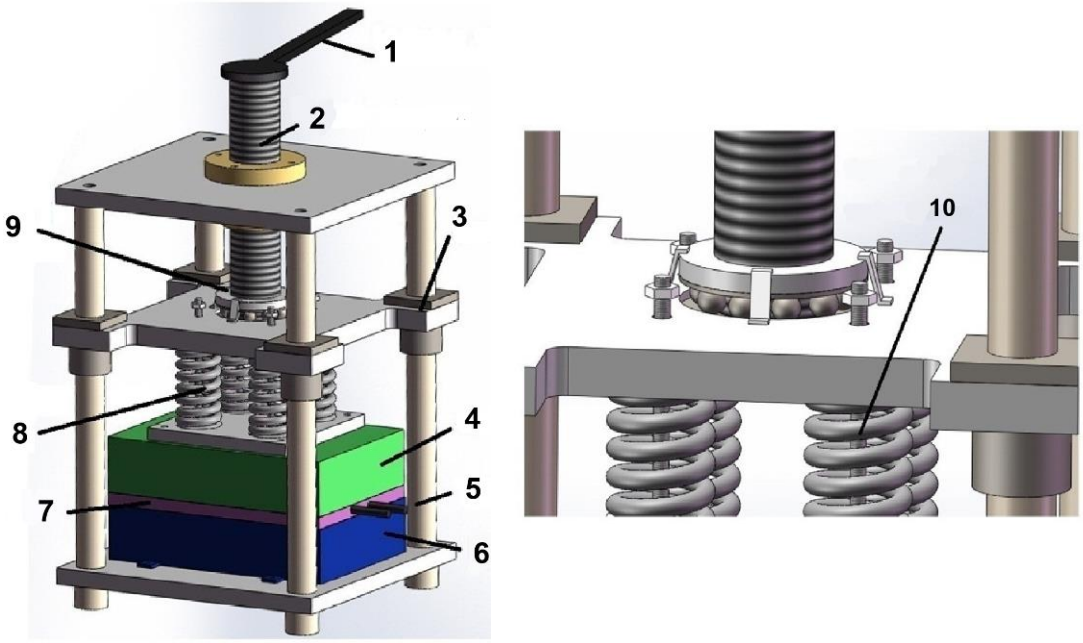
Але розробники обладнання часто стикаються з труднощами нестандартних форм даних про продуктивність, які надаються виробниками термоелектричних модулів. За винятком експериментальних засобів, єдиним методом оцінки продуктивності термоелектричних елементів є аналітичний аналіз і моделювання з використанням властивостей напівпровідникового матеріалу, що використали при виготовленні елементів, які, зазвичай, не розкриваються і є в повній мірі невідомі. У даній статті ми спробуємо запропонувати пристрій для перевірки і оцінки характеристик термоелектричних модулів експериментальним шляхом.

**Аналіз існуючих методів оцінювання параметрів термоелектричних модулів.** Як правило, розробники віддають перевагу простим методам оцінки ефективності, оскільки вони легко можуть бути відтворені споживачами термоелектричних перетворювачів. Експериментальні дослідження оцінюють якість продукту виробника шляхом порівняння експериментальних результатів з результатами, які надаються виробником. Ці випробування проводяться в різних умовах експлуатації, так як невідомо, яка перевірка проводиться виробниками, типовим прикладом може бути, чи відбувалася вона у вакуумному середовищі, чи ні, адже таке середовище дозволить провести більш точні вимірювання теплопередачі.

Д'Анжело і Хоган розробили процедуру випробування для визначення характеристик ТЕГ модуля, яка тривала неперервно впродовж 1 місяця [1]. Їх випробувальний стенд включає в

**© Криницький О.С., к.т.н., доц., Маковишин В.І., к.т.н., Біліщук В.Б. к.т.н., доц.**

себе вакуумний ковпак і джерело постійного тепла, виготовленого з нікель-хромового дроту, розміщеного на гарячій стороні модуля (рис. 1). Отримана ними крива продуктивності ТЕГ добре узгоджувалася з даними від виробника. Це дослідження доводить необхідність вакуумного середовища, щоб звести до мінімуму конвекційні втрати навколо випробувального пристрою, які могли б вплинути на результати вимірювань.




а) б)

Рис. 1. Механічна конструкція установки для визначення характеристик ТЕГ модуля: (а) загальний вигляд (б) детальний вигляд блоку стиснення [1]
1- гайковий ключ; 2- болт подачі; 3- лінійний підшипник; 4- холодна сторона; 5- виходи ТЕГ; 6- гаряча сторона; 7-ізолятор; 8- пружина; 9- упорний підшипник; 10- пружина і направляючі болти

Васкес і ін. розробили випробувальний стенд для вимірювання продуктивності комерційно виготовлених модулів ТЕГ [2]. В їх конструкції застосовувалося поєднання тестового модуля з основним нагрівальним блоком і блоком водяного охолоджувача. Основний блок був джерелом тепла і був ізольований, щоб запобігти тепловтратам в навколишнє середовище. Вони використали два режими роботи. Перший - це зміна температури гарячої сторони, в той час як температура холодної сторони підтримувалася сталою. Другий режим роботи - підтримувалася сталою температура холодного блоку, в той час як вхідна потужність до основного блоку була різною. Їх результати узгоджуються з даними, наданими виробником.

Раушер і ін. провели випробування на ефективність ТЕГ модулів [3] [4] за наступною методикою: тестовий зразок був затиснутий між блоком нагрівача і блоком охолодження (рис. 2). Оскільки ефективність ТЕГ визначається відношенням вихідної потужності до швидкості передачі вхідного тепла, ними було виконано всього два вимірювання. Вихідну потужність ТЕГ легко виміряти за допомогою електронних навантажень, які забезпечують змінний опір навантаження. Що стосується швидкості передачі тепла, щоб уникнути проведення складного вимірювання теплопередачі, то її визначення проводили суто з електричних вимірювань, нехтували тепловтратами в навколишнє середовище і робили припущення що вся надана електрична потужність нагрівачу передавалася вимірювальному зразку. Для виконання припущення про низькі тепловтрати від нагрівального блоку було використано додатковий нагрівач, який компенсував втрати в навколишнє середовище. Керування нагрівачами здійснювалося за допомогою пропорційно-інтегрального контролера, так щоб температура додаткового нагрівача була рівною температурі нагрівального блоку в межах ±0,02 К. Коли обидва нагрівачі знаходилися в тепловій рівновазі, висувалося припущення, що втрати тепла будуть мінімальні і все тепло, котре йде від нагрівального блоку, поглинається лише ТЕГ. Опорна сталева кулька яка знаходиться на вершині нагрівача використовується для створення термічно відокремленої опори, від механізму притискання, який дозволяє надійно притиснути

ТЕГ модуль. Вимірювання можна проводити в атмосфері інертних газів або у вакуумі. Однак результати дослідження, не були порівняні з даними від виробників ТЕГ.

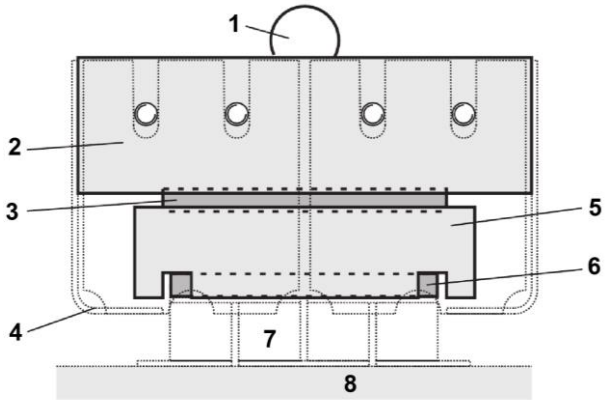



Рис. 2. Установка для визначення характеристик ТЕГ [4].
1 - нагрівач з опорною сталевою кулькою, 2 - мідний блок, 3 – додатковий нагрівач, 4 – екран від теплового випромінювання, 5 - ізоляційний блок, 6 - вимірювач температури, 7 - термоелектричний модуль, 8 - холодний бік модуля.

Аналогічний метод використання додаткових нагрівачів використали Анатичук і Гаврилюк [5]. Їхня установка (рис. 3) містила вимірювач кількості тепла між холодною стороною зразка і холодним радіатором. У ході своїх експериментів вони зрозуміли, що вихідна потужність нагрівача на гарячій стороні може бути визначена через співвідношення з потоком тепла через вимірювач кількості тепла на протилежному кінці модуля. Таким чином, вони зробили калібрування показників теплового вимірювача до вхідної потужності нагрівача для більш швидкої оцінки. Однак даний метод був достатньо громіздким, тому що багато паразитних втрат тепла доводилося або враховувати, або запобігати їх виникненню.

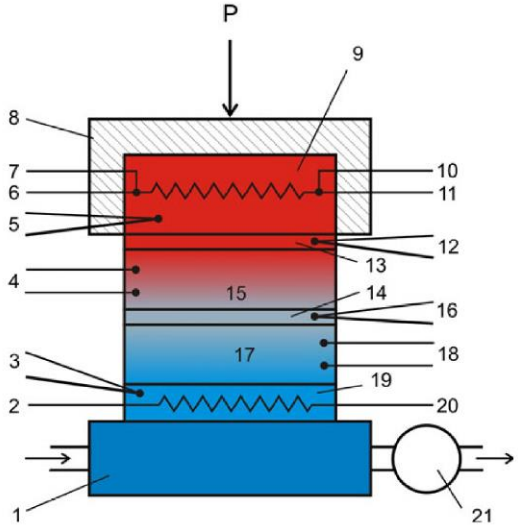
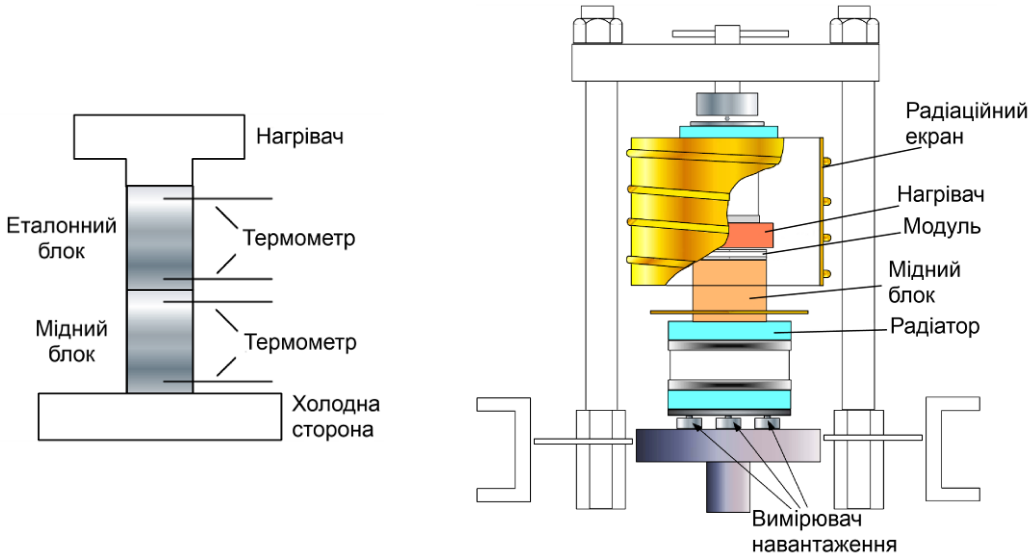



Рис. 3. Схема пристрою для вимірювання параметрів термоелектричних генераторних модулів [5].
1 - холодний теплообмінник; 2,20 - дроти нагрівача холодного теплообмінника; 3 - термопара холодного теплообмінника; 4 - дроти модуля генератора; 5 - термопара гарячого теплообмінника; 6,11 - струмові провідники нагрівача теплообмінника; 7,10 - дроти потенціалу нагрівача гарячого теплообмінника; 8 — гарячий теплообмінник; 9 — нагрівач гарячого теплообмінника; 12 - вимірювальна термопара з боку гарячого модуля; 13, 14 — плити для вирівнювання тепла; 15 — модуль генератора; 16 — вимірювальна термопара з боку холодного модуля; 17 — вимірювач кількості тепла; 18 — дроти до вимірювача кількості тепла; 19 - нагрівач холодного теплообмінника, 21 - клапан охолоджуючої рідини з електричним управлінням.

Таказава і ін. обчислювали ефективності ТЕГ з великими перепадами температур на протилежних сторонах модуля до 500 К [6]. Подібно як і в Анатичука і Гаврилюка [5], швидкість передачі тепла від гарячої сторони була виміряна безпосередньо за допомогою вимірювача кількості тепла між холодною стороною зразка і холодним радіатором. Тепловий

потік вимірювали на основі градієнта температури, що утворюється в мідному блоці з високою теплопровідністю, блок калібрували з використанням еталонного матеріалу. Еталонний матеріал вирізали у відповідну форму, а потім безпосередньо з'єднали з мідним блоком. Теплопровідність мідного блоку визначали вимірюванням різниці температур, що утворюється в еталонному блоці та мідному блоці під час подачі теплового потоку (рис. 4, а). Мідний блок постійно підтримується при температурі 300 К під час експерименту. Випробувальний пристрій було поміщено у вакуумі для зниження теплопровідності повітря ($<10^{-3}$ Па), так як теплопровідність повітря різко знижується приблизно при $10^{-1}$ Па. Електричну потужність, вироблену модулем, вимірювали за допомогою електронного навантаження. Навколо нагрівача та термоелектричного модуля був розміщений охолоджуваний водою радіаційний екран для запобігання нагріванню опори колони та вакуумної камери (рис 4, б). Нагрівання цих компонентів генерує додаткове тепло, випромінювання яких впливає на мідний блок і, таким чином, призводить до помилок у вимірі теплового потоку. Проте, незважаючи на те, що було використано радіаційний захист, не всі втрати на випромінювання були попереджені при екстремальних температурах.




а) б)

Рис. 4. Схема, яка використовується для калібрування вимірювача кількості тепла (а) і вигляд вимірювальної системи [6].

Сандоз-Розсадо і Стівенс розробили випробувальний стенд, щоб визначити продуктивність модулів ТЕГ [7]. Вони показали, що швидкість передачі тепла була найскладнішою для вимірювання. Вони аналітично розрахували продуктивність модулів ТЕГ за відомими характеристиками властивостей матеріалів, які були надані виробниками модулів. Їх аналітична модель враховувала паразитні втрати, які мали місце в керамічних пластинах. Порівнюючи свої аналітичні та експериментальні результати з продуктивністю, що надається виробниками, був зроблений висновок про те, що представлені властивості матеріалу були неточними.

Чен і Віліамс провели експериментальне дослідження швидкості передачі тепла і ефективності термоелектричних систем охолодження [8]. Їх аналітичний підхід розроблений на основі ідеальних термоелектричних рівнянь і вони розглядають два підходи щодо визначення термоелектричних властивостей матеріалу: 1 – властивості, залежні від температури, 2 - властивості не залежні від температури. Поряд з цими значеннями, Чен і Віліамс також оцінювали властивості матеріалу при середній робочій температурі і їх результати показали, що будь-який підхід має похибку, меншу 10%.

Крафтмайкер провів ряд простих експериментів з термоелектричним модулем для його роботи в якості нагрівача, охолоджувача і генератора енергії [9]. Блоки нагрівання і охолодження були використані для створення необхідної температури. При роботі ТЕГ в режимі генерування електроенергії швидкість передачі тепла на гарячу керамічну пластинку була точно обчислена шляхом встановлення і підтримки холодної сторони при 0○С і, регулюючи нагрів на гарячій стороні, поки температура не була рівна температурі

навколишнього середовища. У такому випадку тепло від нагрівача не витрачається в навколишнє середовище, а поглинається повністю модулем. При роботі в якості охолоджувача гаряча сторона підтримувалася при температурі навколишнього середовища, в той час як нагрівач на холодній стороні встановлювали таким чином, щоб різниця температур через модуль була відсутня ($T_c = T_x$). Описані експерименти показують прості способи визначення величин, важливих для теорії термоелектричних пристроїв. Щоб виключити вплив теплообміну на навколишнє середовище, вимірювання проводяться в умовах, коли температура верхньої сторони модуля близька до кімнатної.

Фарджі і Акбарзаде розроблений компактний випробувальний стенд, щоб оцінити продуктивність модулів ТЕГ [10]. В якості джерела тепла був використаний блок нагрівача, в той час як температура на холодній стороні модуля підтримувалася за допомогою водяного охолодження. Для мінімізації розмірів системи охолодження в якості охолоджувача для циркулюючої рідини було використано модуль ТЕО. Модуль розміщували між холодними та гарячими блоками за допомогою термопасти і стискали із силою 500 кПа. Температура гарячої та холодної сторін встановлювали на рівні 150°C, 50°C відповідно, після очікування 1 год, щоб досягти стійкого стану рівноваги температур здійснювався запис вихідної напруги та струму. Для вимірювання струму використовувалися навантаження опором від 20 Ом і поступово зменшувалося до 1 Ом. Значення опору навантаження, при якому була досягнута максимальна вихідна потужність, було визначено як внутрішній опір модуля. Їх результативні експериментальні криві близькі до даних, представлених виробником. У своєму дослідженні вони наголосили на важливості надання достатньої сили притиску між ТЕГ і блоками нагріву і охолодження; збільшення сили стиснення, призводило до зниження опору контакту і поліпшувало вихідну потужність до певної межі. Дослідження достатньої притискної сили для зменшення опору контактів було також підтримано Монтекко і співав. [11] [12].

Хсу і ін. провели дослідження, які були зосереджені на вимірюванні термо-ЕРС модуля, шляхом визначення того, що вони назвали «ефективний коефіцієнт Зеєбека» [13]. Їх результати коефіцієнта Зеєбека показали різницю близько 30% в порівнянні із значеннями, наданими виробниками, і вони приписують ці розбіжності двом ефектам: 1 - збільшення теплового опору між контактами модуля при низьких силах притискання, 2 - неточні покази термопар, поміщених на керамічних пластинах модуля під час роботи. Ці температури були неточні через теплові контактні опори і, таким чином, вони побудували детальні теплові залежності опору для визначення різниці температур і точного визначення температури сторін. Вони припустили, що за рахунок використання концепції «ефективного коефіцієнта Зеєбека» аналітичні обчислення були більш точні.

Метод Хармана є спрощеним, але точним методом вимірювання безрозмірної термоелектричної добротності $ZT$, який широко застосовується в термоелектриці [14]. Цей метод вперше був запропонований Т. С. Харманом в 1958 році для оцінювання добротності термоелектричних матеріалів, і цей метод був названий на його честь. Методика вимірювання грунтується на вимірюванні напруги холостого ходу $U_\alpha$ і спаду напруги на модулі, коли струм проходить через зразок. Якщо не враховувати Джоулевий нагрів і ефект Томпсона, Харман запропонував:

$$ZT = \frac{U_\alpha}{IR} \tag{1}$$

Слід звернути увагу, що при використанні методу необхідно помістити тестовий зразок у вакуумне середовище, а джерело струму для вимірювання падіння напруги має бути досить мале, щоб створити ефект Пельтьє і викликати різницю температур в зразку, але досить великої сили, щоб викликати істотний Джоулевий нагрів [15]. Так як показник термоелектричної добротності є основним показником якості для термоелектричних матеріалів, його значення має широкий інтерес для розробників.

Лау вивчав вплив різних рівнів вакууму на тестовому зразку, коли був застосований метод Хармана для визначення $ZT$ [16]. Проте, результати не враховують всі невизначеності при різних рівнях тиску у вакуумній ємності.

Мін і Рове запропонував модифікацію методу Хармана при визначенні $ZT$ [17]. Даний метод економить час, але його точність близько 20% і є істотно гіршою, ніж отриманий при вимірюванні електричних та теплових властивостей окремо (~ 10% у цьому випадку). У своїй публікації вони показали, що шляхом вимірювання різниці температур при короткому

замиканні $\Delta T_к$ і при розімкнутому колі $\Delta T_0$ можна визначити безрозмірний показник добротності за виразом:

$$ZT = \frac{\Delta T_к}{\Delta T_0} - 1 \qquad (2)$$

Перевага даного методу в порівнянні з початковим методом Хармана є те, що даний метод вимагає тільки стійкого стану, а не адіабатних умов, як в методі Хармана.

Крім того, коли виходи ТЕГ не замкнені, а підключені до навантаження з опором $R_н$, рівняння (2) можна виразити як:

$$\frac{\Delta T}{\Delta T_R} = 1 + ZT\left[\left(\frac{R}{R+R_н}\right)\left(\frac{2T_г}{T_г+T_х}\right) - \left(\frac{R}{R+R_н}\right)^2\left(\frac{T_г-T_х}{T_г+T_х}\right)\right] \qquad (3)$$

Рівняння (3) дозволяє проводити вимірювання за будь-якого струму через вибір опору навантаження $R_н$, тоді як вимірювання, зроблені на основі рівняння (2), проводяться за певного струму, тобто лише струму короткого замикання. В принципі, $ZT$, визначений через $\alpha^2\sigma T/\chi$, не залежить від вимірювального струму. Однак на практиці оцінка $ZT$ для сегментованого термоелектричного матеріалу або з функціональним градієнтом може суттєво вплинути шляхом вимірювання різниці струму або температури в ньому через «внутрішній» ефект Пельтьє та ефект Томсона. Видно, що рівняння (3) надає практичну можливість оцінити реалістичне значення $ZT$ сегментованих матеріалів та матеріалів з функціональними градієнтами, раніше це було важким завданням.

**Реалізація методу вимірювання параметрів ТЕГ.** Двома важливими параметрами для термоелектричних генераторів є ефективність перетворення $\eta$ та термоелектрична добротність $ZT$. В даний час використовуються два методи вимірювання добротності ТЕГ: із застосуванням методу Хармана для безпосереднього вимірювання $ZT$ або окреме вимірювання коефіцієнтів термо-ЕРС $\alpha$, електропровідності $\sigma$, теплопровідності $\chi$, звідки:

$$ZT = \frac{\alpha^2\sigma T}{\chi}. \qquad (4)$$

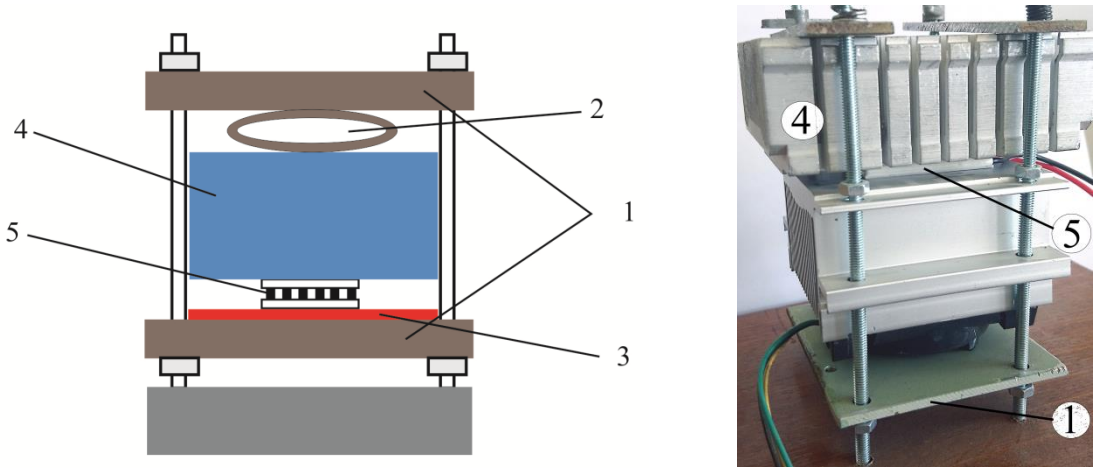
Розроблюваний пристрій для кількісної оцінки важливих параметрів одного термоелектричного модуля з розмірами 40×40 мм і не має обмеження по його товщині, базується на методі Хармана. Принцип полягає у створенні регульованого теплового потоку через ТЕГ шляхом створення різниці температур у модулі, а потім вимірювання та контроль електричних та теплових параметрів. Вхідний тепловий потік створюється керамічним нагрівачем потужністю 100 Вт і напругою 24 В. Тепло проходить через ТЕГ, і частина його перетворюється в електричну енергію модулем ТЕГ, решта - за виключенням втрат тепла через сторони блоків - досягає холодного блоку.

В установці, яка схематично представлена на рис.5, нагрівання модуля 5 здійснюється за допомогою плоского керамічного нагрівника 3, який увімкнений у мережу постійного струму через терморегулятор, котрий забезпечує стабілізацію температури на модулі. Для вимірювання температури використано термопари типу ХК. Охолодження протилежної сторони модуля 5 здійснюється за допомогою радіатора 4 з активним охолодженням, або можливе використання порожнистої пластини із заповненням її водою для збільшення ефективності охолодження. Притискання модуля ТЕГ до радіатора і нагрівача реалізовується за допомогою притискного механізму, який реалізований притискною планкою 1 і пружиною тарілчастого типу 2, також можлива реалізація виміру зусилля притискання шляхом виймання пружини і притискання модуля планкою і вибір зусилля динамометричним ключем. Для більшої повторюваності результатів експерименту, а також для зменшення тепловтрат вимірювальну комірку рекомендується помістити під вакуумний ковпак.

Методика вимірювання параметрів наступна: ТЕГ нагрівається до певної температури, після стабілізації температури очікують ≈5-15 хв. для стабілізації теплових потоків в модулі. Після чого проводяться вимірювання температури гарячої і холодної сторін, напруги холостого ходу ТЕГ і струму, який може згенерувати модуль. Для створення навантаження для модуля ТЕГ використано електронне навантаження, побудоване за стандартною схемою на операційному підсилювачі і польовому транзисторі. Процес вимірювання повторюється для кількох заданих температур. Для обчислення добротності модуля на нього короткочасно

подається напруга і вимірюються спад напруги на модулі $U_\rho$, а також генерована ним напруга $U_\alpha$. Маючи значення заданої температури $T$, можна розрахувати значення добротності модуля

$$ZT = \frac{U_\alpha}{U_\rho T}. \quad (5)$$




а) б)

Рис. 5. Схематичний вигляд (а) реальний вигляд (б) установки для вимірювання термоелектричних параметрів

Ефективність перетворення $\eta$ для ТЕГ можна визначити із рівняння:

$$\eta = \frac{\Delta T}{T_г} \frac{\sqrt{1+ZT}-1}{\sqrt{1+ZT}+T_x/T_г}. \quad (6)$$

**Висновки:**

В даній роботі було проведено аналіз відомих методів вимірювання параметрів термоелектричних генераторів. Розроблено пристрій, який дозволяє оцінювати і вимірювати такі параметри як термоелектрична добротність, напруга холостого ходу, максимальний вихідний струм генератора, внутрішній опір модуля.

**Література**

1. J. D'Angelo, T. Hogan, "Long term thermoelectric module testing system," Review of Scientific Instruments, vol. 80, pp. 1-3, October 2009.

2. J. Vazquez, R. Palcios, M. A. Sanz-Bobi, A. Arenas, "Test bench for measuring the electrical properties of commercial thermoelectric modules," in 22nd International Conference on Thermoelectrics, 2003, pp. 589-593.

3. L. Rauscher et al., "New approach for highly accurate efficiency determination of thermoelectric generator," in 22nd International Conference on Thermoelectrics, 2003, pp. 508-511.

4. L. Rauscher, S. Fujimoto, H. T. Kaibe, and S. Sano, "Efficiency determination and general characterization of thermoelectric generators using an absolute measurement of the heat flow," Measurement Science and Technology, vol. 16, pp. 1054-1060, March 2005.

5. L. I. Anatychukl, M. V. Havrylyuk, "Procedure and equipment for measuring parameters of thermoelectric generator modules," Journal of Electronic Materials, vol. 40, no. 5, pp. 1292-1297, March 2011.

6. H. Takazawa et al., "Efficiency measurement of thermoelectric modules operating in the temperature difference of up to 550K," in 2006 International Conference on Thermoelectrics, 2006, pp. 189-192.

7. E. J. Sandoz-Rosado, R. J. Stevens, "Experimental characterization of thermoelectric modules and comparison with theoretical models for power generation," Journal of Electronic Materials, vol. 38, no. 7, pp. 1239-1244, 2009.

8. K. Chen, S. B. Gwilliam, "An analysis of the heat transfer rate and efficienct of TE (thermoelectric) systems," International Journal of Energy Research, vol. 20, pp. 399-417, 1996.

9. Y. Kraftmakher, "Simple experiments with a thermoelectric module," European Journal of Physics, vol. 26, pp. 959-967, 2005.

**© Криницький О.С., к.т.н., доц., Маковишин В.І., к.т.н., Біліщук В.Б. к.т.н., доц.**

10. A. Y. Faraji, A. Akbarzadeh, "Design of a compact, portable test system for thermoelectric power generator modules," Journal of Electronic Materials, vol. 42, no. 7, pp. 1535-1541, November 2013.

11. A. Montecucco, J. Buckle, J. Sivter, A. R. Knox, "A new test rig for accurate nonparametric measurement and characterization of thermoelectric generators," Journal of Electronic Materials, vol. 42, no. 7, pp. 1996-1973, 2013.

12. F. A. Leavitt, N. B. Elsner, J. C. Bass, "Use, application and testing of Hi-Z thermoelectric modules," Hi-Z Technology, Inc., San Diego, Product Testing Instructions.

13. C. Hsu, G. Huang, H. Chu, B. Yu, D. Yao, "An effective Seebeck coefficient obtained by experimental results of a thermoelectric generator module," Applied Energy, vol. 88, pp. 5173-5179, 2011.

14. T. C. Harman, "Special techniques for measurement of thermoelectric properties," Journal of Applied Physics, vol. 29, pp. 1373-1374, June 1958.

15. S. B. Mahajan, "Design of a compact, portable test system for thermoelectric power generator modules," Rochester Institute of Technology, Rochester, Master Thesis UMI Number: 1543212, 2013.

16. P. G. Lau, "Convection correction factor determination for use with the transient test method for thermoelectric modules," in 18th International Conference on Thermoelectrics, 1999, pp. 252-255.

17. G. Min, D. M. Rowe, "A novel principle allowing rapid and accurate measurement of a dimensionless thermoelectric figure of merit," Measurement Science and Technology, vol. 12, pp. 1261-1262, May 2001.

**[1]Krynytskyi O.S, [2]Makovyshyn V.I., [1]Bilishchuk V.B.**
1 Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
2 Ivano-Frankivsk National Medical University

## DEVELOPMENT DEVICE FOR EVALUATION PARAMETERS OF THERMOELECTRIC MODULES

The paper presents an overview of methods and means of measuring parameters that characterize the efficiency of thermoelectric generators. The two most important parameters for evaluating the efficiency of thermoelectric generators are the conversion efficiency and thermoelectric quality factor. Despite the alleged simplicity of methods for measuring these parameters, their practical implementation is associated with significant difficulties, which makes it difficult to estimate the parameters of thermoelectric generators. The paper proposes a simple, according to the author, method for estimating the parameters of thermoelectric generators.

**Keywords**: thermoelectric generator, electrical conductivity, thermoelectric quality factor

**[1]Криницкий А.С., [2]Маковишин В.И., [1]Билищук В.Б.**
1 Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа
2 Ивано-Франковский национальный медицинский университет

## РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ

В работе представлен обзор методов и средств измерения параметров, характеризующих эффективность работы термоэлектрических генераторов. Двумя важнейшими параметрами для оценки эффективности работы термоэлектрических генераторов является эффективность преобразования и термоэлектрическая добротность. Несмотря на кажущуюся простоту методов измерения этих параметров, их практическая реализация связана со значительными трудностями, это приводит к затруднению оценки параметров термоэлектрических генераторов. В работе предложен простой, по мнению автора, метод для оценки параметров термоэлектрических генераторов.

**Ключевые слова**: термоэлектрический генератор, электропроводность, термоэлектрическая добротность

© **Криницький О.С., к.т.н., доц., Маковишин В.І., к.т.н., Біліщук В.Б. к.т.н., доц.**

УДК 631.358.42
**Лінник А.Ю., Фльонц О.В.**
Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України «Бережанський агротехнічний інститут»

# ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕМАТИКО-ДИНАМІЧНИХ ЗВЯЗКІВ ОЧИСНИКА З КОРЕНЕПЛОДОМ

*Зниження собівартості цукрової сировини поряд з підвищенням її якості дозволить підтримувати та підвищити конкурентноспроможність українських виробників цукру на міжнародному рівні, а також будуть створені передумови для зниження вартості кінцевого продукту на внутрішньому ринку. Одним із шляхів досягнення такої мети виступає застосування таких технічних рішень під час виробництва сировини які забезпечать зниження затрат праці та енергоємність процесів виробництва.*

*У статті розглянуто взаємодію очисника з голівкою коренеплоду цукрового буряка з метою дослідження динамічних показників очисника з урахуванням механічних властивостей тіла головки коренеплоду та залишків гички, а також їх геометричних розмірів. Межі допустимого навантаження з боку робочого органу очисника на головку коренеплоду виходячи з умов не пошкодження кореня, але руйнування залишків гички визначено розглянувши контактну задачу взаємодії поверхні очисника-голівка коренеплоду залишок гички. Для аналізу динаміки взаємодії, а саме визначення зусиль, що діють на поверхню коренеплоду та залишки гички, а отже і напружень на поверхні контакту очисника з коренем визначено кінематичні показники кінців лопатей та прутків очисника. Крім того, умови якості виконання процесу очищення голівок коренеплодів будуть залежати від кінематичного режиму роботи очисника, який забезпечить умову відсутності пропусків контакту лопать-поверхня голівки коренеплоду та забезпечить мінімальне пошкодження коренів за рахунок повторного контакту лопатей очисника з коренем. Отримано величину відношення переносної та кутової швидкостей очисника, яка забезпечує відсутність пропусків контакту лопатей очисника з головкою коренеплоду що є коефіцієнтом кінематичного режиму роботи ротаційного очисника з віссю обертання паралельною до напрямку переносної поступальної швидкості.*

*Аналіз динамічних та кінематичних параметрів роботи очисника дозволяє вибрати раціональні параметри роботи машини виходячи з конструктивних особливостей робочих органів, агрофізичних властивостей контактуючих тіл та характеристик агрофону поля.*

***Ключові слова:*** *гичка, залишки гички, коренеплід, очистка, пляма контакту, модуль пружності, критерій руйнування Треска.*

**Постановка проблеми.** Однією з нагальних проблем при збиранні коренів цукрових та кормових буряків є доочищення голівок коренеплодів. В цій проблемі важливе місце належить розв'язанню задачі якісного доочищення головок коренеплодів від залишків гички при умові збереження цілісності продуктивної частини кореня. Ефективність роботи очисників головок коренеплодів визначають ступінь відокремлення залишків гички та показник пошкодження головок коренеплодів [3]. Це якісні показники, для визначення яких необхідно дослідити динаміку взаємодії робочих органів очисника з коренеплодом з урахуванням допустимих напружень у тілі кореня, виходячи з критерію його міцності при умові забезпечення максимального відділення залишків гички.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій** При розробці робочих органів та визначенню їх кінематичних та динамічних параметрів часто не зовсім адекватно формулюється задачі. Внаслідок цього до цього часу не існує чіткої теоретично обґрунтованої методики визначення кінематичних та динамічних параметрів та режимів роботи таких робочих органів які б дозволили враховувати механічні властивості та геометричні параметри коренів та залишків гички на них.

Відомі дослідження показників роботи очисників головок коренеплодів показують, що найбільш ефективно працюють очисники ротаційного типу з комбінованими лопатево-пальцевими робочими органами [4]. Теоретичні дослідження стосуються, в основному, взаємодії жорсткого робочого органу з коренеплодом [5], в той час як еластичні робочі органи забезпечують менше пошкодження головок коренеплодів при достатній якості їх очищення від залишків гички. Тому дослідження в цьому напрямку є актуальними та своєчасними.

**© Лінник А.Ю., Фльонц О.В.**

**Мета досліджень.** Метою даної роботи є визначення динамічних показників роботи доочисника коренеплодів в залежності від механічних властивостей тіла головки коренеплоду та залишків гички а також їх геометричних розмірів.

**Результати досліджень.** 1. Для визначення меж допустимого навантаження з боку робочого органу очисника на головку коренеплоду з умов не пошкодження кореня але руйнування залишків гички доцільно розглянути контактну задачу поверхня очисника-голівка коренеплоду (залишок гички).

В нашому випадку [6] взаємодію очисника з коренеплодом (залишком гички) можна представити схемою що наведена на рис. 1. Тобто у вигляді плоскої задачі контакту двох тіл форми поверхонь обертання.

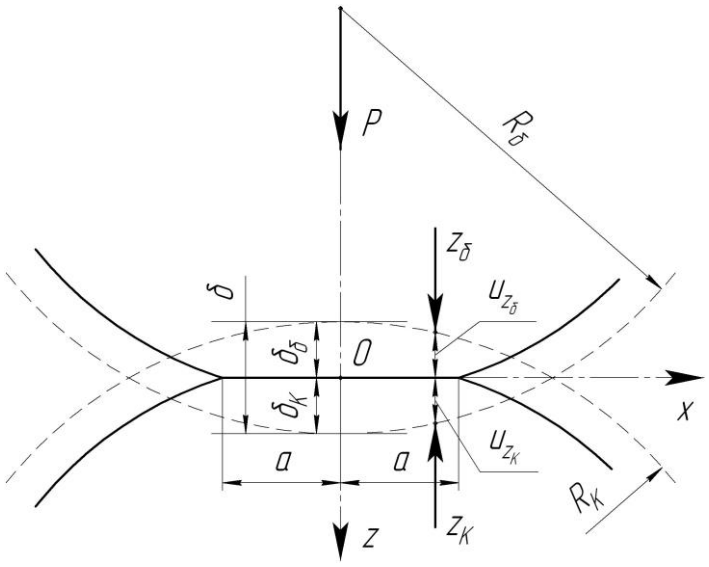



Рис.1. Схема до визначення контакту очисника з голівкою коренеплоду (залишком гички)

В процесі взаємодії два тіла очисник та корінь (в загальному випадку з радіусами кривизни $R_á$ та $R_â(R_ê))$ контактують по довжині прямолінійної частини довжини $2a$. При цьому їх центри наближуються на осі на величину $\delta = \delta_á + \delta_ê$

Необхідно визначити: розміри плям контакту $2a$, зближення $u_{zá} + u_{zê} = \delta = \delta_á + \delta_ê$; середній нормальний тиск $P_m$ і максимальний тиск $P_o$.

Якщо точки $S_ê, S_á$ поверхонь прийшли у дотик, то

$$u_{zá} + u_{zê} + h = \delta_\delta + \delta_k = \delta. \quad (1)$$

Співвідношення між переміщеннями та геометрією контактуючих тіл [1] можуть бути подані у вигляді:

$$\left(\frac{u_{z\delta}(0)}{a} - \frac{u_{zk}(x)}{a}\right) + \left(\frac{u_{z\delta}(0)}{a} - \frac{u_{zk}(x)}{a}\right) = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{R_\delta} + \frac{1}{R_k}\right)\frac{x^2}{a}. \quad (2)$$

Покладемо, що *x=a* та введене позначення $u_z(0) - u_z(a) = d$ тоді (2) прийме вигляд:

$$\frac{d_\delta}{a} + \frac{d_k}{a} = \frac{a}{2}\left(\frac{1}{R_\delta} + \frac{1}{R_k}\right).$$

Враховуючи, що розмір зони контакту *a = d* отримуємо, що деформування кожного тіла характеризується відношенням сумарної деформації до напіврозміру зони контакту *d/a*. З другого боку величина деформації пропорційна контактному тиску, віднесеному до модуля пружності:

$$\frac{P_m}{E_\delta} + \frac{P_m}{E_k} = a\left(\frac{1}{R_\delta} + \frac{1}{R_k}\right), \text{ звідки:}$$

© Лінник А.Ю., Фльонц О.В.

$$P_m = \frac{a\left(\frac{1}{R_\delta}+\frac{1}{R_k}\right)}{\frac{1}{E_\delta}+\frac{1}{E_k}}\ , \tag{3}$$

де $P_m$ - середній контактний тиск;

$E_\delta, E_k$ - модулі пружності тіл, що контактують (бияка та кореня).

Головка кореня буряка має поверхню тіла обертання з конусом $R_k$, поверхня очисника має радіус кривизни $R \to \infty$, тоді відносна кривизна $\frac{1}{R} = \left(\frac{1}{R_k}+\frac{1}{\infty}\right) = \frac{1}{R_k}$, для простоти будемо писати $\frac{1}{R}$, згідно [1] сумарне переміщення в будь якій точці зони контакту, якщо контакт відбувається по області:

$$u_{zá} + u_{zê} = \delta - \frac{r^2}{(2R)}, \tag{4}$$

де $r$ - відстань від центру контакту до місця в якому визначається зближення $\delta$. Розподіл тиску в зоні контакту кругової області [2]:

$$P = P_0\left(1 - r^2/a^2\right)^{\frac{1}{2}}$$

зумовлює нормальні заміщення:

$$u_z(r) = \frac{1-\nu^2}{\pi E}\frac{P_0}{a}\int_0^{2\pi}\frac{\pi}{4}(a^2 - r^2 + r^2\cos^2\varphi)Rd\varphi = \text{, при } r \le a, \tag{5}$$

$$= \frac{1-\nu^2}{E}\frac{\pi P_0}{4a}(2a^2 - r^2)$$

де $\varphi -$ кут повороту в зоні контакту для полярних координат представлення кругової зони контакту.

Тиск, що діє з боку очисника дорівнює тиску на корінь. Введемо в розгляд приведений модуль пружності $E'$:

$$\frac{1}{E'} = \frac{1-\nu_k^2}{E_k} + \frac{1-\nu_\delta^2}{E_\delta}. \tag{6}$$

Перепишемо (4) з урахуванням (6) та (5):

$$2\frac{1}{E'}\frac{\pi P_0}{4a}(2a^2 - r^2) = \delta - \frac{r^2}{2R}. \tag{7}$$

В центрі зони контакту $u_{zá} + u_{zê} = \delta$, а границі зони контакту відповідає значення $r = a$, тому з (7) маємо:

$$a = \frac{\pi P_0 R}{4E'}. \tag{8}$$

Зближення тіл (сумарні зміщення) $u_{zá}(0) + u_{zê}(0) = \delta$ знаходяться при умові, що $r = 0$, тоді з (7):

$$\delta = \frac{\pi a P_0}{2E'}. \tag{9}$$

З урахуванням властивостей кореня та очисника вирази (8) та (9) перепишуться у вигляд:

$$a = \frac{\pi P_0 R_k}{2}\left(\frac{1-\nu_\delta^2}{E_\delta} + \frac{1-\nu_k^2}{E_k}\right);\ \delta = \frac{\pi a P_0}{2}\left(\frac{1-\nu_\delta^2}{E_\delta} + \frac{1-\nu_k^2}{E_k}\right). \tag{10}$$

Повне навантаження , що стискає очисник та корінь:

$$P = \int_0^a P(r)\, 2\,a\, r\, dr = \frac{2}{3} P_0\, \pi\, a^2 . \tag{11}$$

З виразу (11): $P_0 = \dfrac{3P}{2\pi a^2}$.

Максимальний тиск у зоні контакту від дії повного навантаження в залежності від властивостей кореня та очисника виразиться як:

$$P_0 = \frac{\sqrt[3]{6}\, E_\delta^{2/3}\, E_k^{2/3}\, P^{1/3}}{\pi \left( R^2 \left( E_k(\nu_\delta^2 - 1) + E_\delta(\nu_k^2 - 1) \right)^2 \right)^{\frac{1}{3}}} . \tag{12}$$

Максимальні значення напруження будуть знаходитись на осі $oz$, а їх значення згідно [2] :

$$\sigma_x = -\frac{P_0}{a}\left[ \left(a^2 + 2z^2\right)\left(a^2 + z^2\right)^{-\frac{1}{2}} - 2z \right];$$

$$\sigma_z = -P_0 a \left(a^2 + z^2\right)^{-\frac{1}{2}}; \tag{13}$$

$$\tau_{xz} = P_0 a [z - z^2 \left(a^2 + z^2\right)^{-\frac{1}{2}}].$$

Умова руйнування кореня може бути прийнята за Треском у вигляді $\tau_{\max} \le [\tau]$.

Знайдемо екстремум функції $\tau_{xz}$ з умови $\dfrac{d\tau_{xz}}{dz} = 0;$

звідки $z\big|_{\tau_{xz}=\max} = \sqrt{\dfrac{1}{2}(\sqrt{5}-1)}\sqrt{a^2} \approx 0.78\, a$.

При цьому $\tau_{xz\max} = 0.3 P_0$. З виразів (12) та (13) можна знайти максимальне значення сили що може діяти на корінь, яка не завдасть йому руйнівних напружень:

$$P_{\max} \le \frac{\pi (R^2 (E_k(\nu_\delta^2 - 1) + E_\delta(\nu_k^2 - 1))^2}{6 E_\delta^2 E_k^2} \tau_k^3 . \tag{14}$$

З другого боку при дії на залишок гички на коренеплоді у виразі (14) сила $P$ повинна перевищувати значення необхідне для руйнування залишка гички:

$$P_{\min} \ge \frac{\pi \left( R_2^{\,2} (E_{\tilde{a}}(\nu_\delta^2 - 1) + E_\delta(\nu_r^2 - 1) \right)^2}{6 E_\delta^2 E_{\tilde{a}}^2} \tau_{\tilde{a}}^3 . \tag{15}$$

Такими є співвідношення, що визначають значення межі сили, що повинна діяти на коренеплід для забезпечення руйнування залишків гички без пошкодження тіла коренеплоду.

При цьому випадок коли сила $P$ є дотичною до залишку гички може не розглядатися, оскільки в цьому випадку $P_{\min}$ забезпечить злам залишку.

Для аналізу динаміки взаємодії, а саме визначення зусиль, що діють на поверхню коренеплоду та залишки гички, а отже і напружень на поверхні контакту биряків та прутків робочого органа з коренем необхідно визначити кінематичні показники кінців лопатей та прутків очисника. Крім того, умови якості виконання процесу очищення голівок коренеплодів будуть залежати від кінематичного режиму роботи очисника, який забезпечить умову відсутності пропусків контакту лопать-поверхня та забезпечить мінімальне пошкодження коренів за рахунок повторного контакту лопатей з коренем.

В загальному випадку, вісь обертання очисника розташована перпендикулярно напрямку руху машини $v_m$ (рис.2). При обертанні вала очисника з кутовою швидкістю $w$, кінці лопаті та прутка матимуть колові швидкості у відносному русі [4]:

$$v_{lo} = wr\ ;\ v_{po} = wR\,, \tag{16}$$

де $r, R$ - відповідно довжина лопаті та прутка.

© Лінник А.Ю., Фльонц О.В.

В абсолютному русі лопаті та прутки робочого органу здійснюють рух по гвинтовій лінії (рис. 3). Параметром цієї гвинтової лінії є величина $S$ (відстань між сусідніми однойменними точками однієї лопаті) за повний оберт робочого органу при проходженні шляху $t_s v_m$. При цьому час $t_w$, за який відбувається повний оберт очисника, дорівнює (за умов наявності однієї лопаті):

$$t_w = \frac{2\pi}{w}. \tag{17}$$

А час, за який машина пройде шлях $S$, становить:

$$t_s = \frac{S}{v_m}. \tag{18}$$

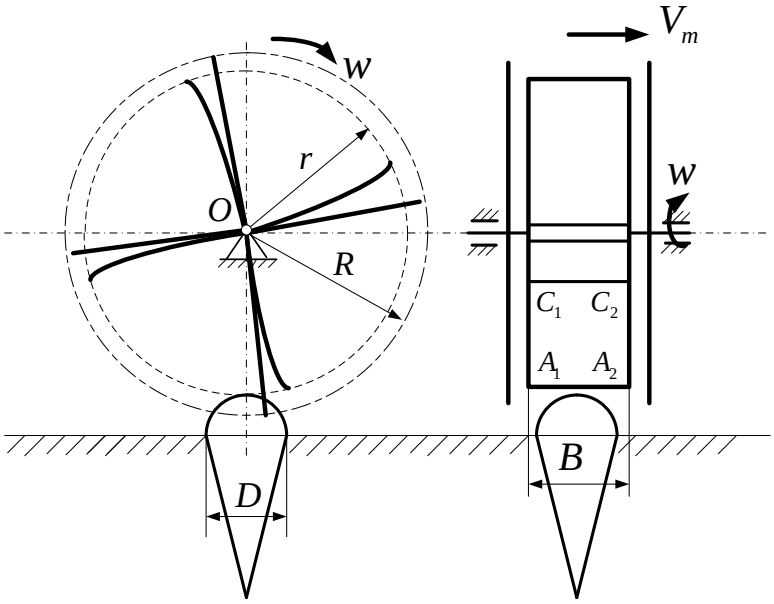



Рис.2. Загальна схема взаємодії очисника з головкою коренеплоду

Для запобігання пропусків контакту лопаті з головкою кореня необхідно щоб виконувалась умова: $t_w \le t_s$ , або $\frac{2\pi}{w} \le \frac{S}{v_m}$. З урахуванням наявності декількох ($n$) лопатей на роторі, останній вираз матиме вигляд:

$$\frac{2\pi}{nw} \le \frac{S}{v_m}. \tag{19}$$

А якщо враховувати ширину лопаті $B$, тобто $S = B$, то останній вираз матиме вигляд: $\frac{2\pi}{nw} \le \frac{B}{v_m}$. Помноживши праву та ліву частини цього виразу на $v_m$ та виконавши деякі перетворення, можна отримати величину відношення переносної та кутової швидкостей очисника, яка забезпечує відсутність пропусків контакту лопатей очисника з головкою коренеплоду:

$$\frac{v_m}{w} \le \frac{Bn}{2\pi}. \tag{20}$$

Таким чином вираз (20) є коефіцієнтом кінематичного режиму роботи ротаційного очисника з віссю обертання паралельною до напрямку переносної поступальної швидкості (швидкості машини).

© Лінник А.Ю., Фльонц О.В.

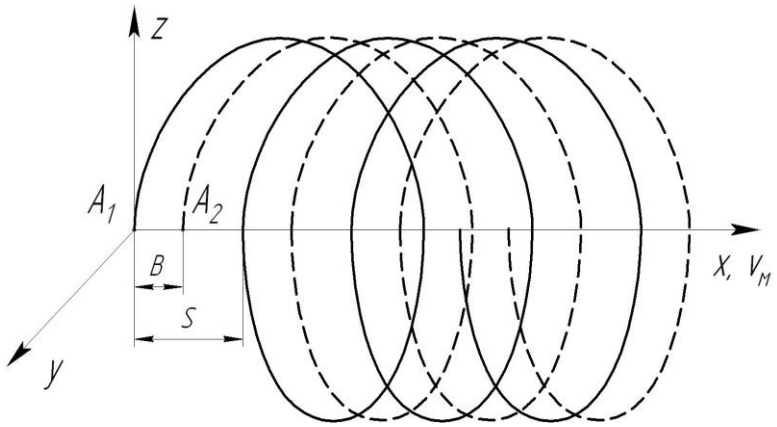



Рис. 3. Траєкторія абсолютного руху кінцевих точок лопаті та прутка очисника коренеплодів

Абсолютні швидкості кінця лопаті та пальця становлять:

$$v_l = \sqrt{{v_m}^2 + r^2 w^2}\ ;\ v_p = \sqrt{{v_m}^2 + R^2 w^2}\ . \tag{21}$$

Величина $v_m$ визначається технологічними можливостями агрегату, а величина $w$ та конструктивні параметри очисника можуть бути обґрунтовані на основі динамічного аналізу взаємодії лопать - голівка коренеплоду з урахуванням допустимих динамічних навантажень, тобто руйнування гички і відсутності пошкоджень тіла коренеплоду. Виразивши з (2) $w$ та підставивши в останні вирази, можна отримати:

$$v_l = v_m \sqrt{1 + r^2 \left(\frac{2\pi}{nB}\right)^2}\ ;\ v_p = v_m \sqrt{1 + R^2 \left(\frac{2\pi}{nB}\right)^2} \tag{22}$$

Слід відзначити, що за умов рівномірного переносного руху, тобто постійної швидкості переміщення, прискорення кінця лопаті та кінця пальця при гвинтовому русі залежать лише від їх радіусів та кутової швидкості:

$$a_l = r w^2\ ;\ a_p = R w^2\ . \tag{23}$$

Враховуючи прискорення лопаті в точці контакту зусилля, що діє з боку очисника на головку коренеплоду визначиться як:

$$F = M_l r w^2\ , \tag{24}$$

де $M_l$ - маса очисника, приведена до точки контакту.

Приведена маса $M_l$ може бути визначена враховуючи умову, що кінетична енергія всієї системи відносно точки обертання дорівнює кінетичній енергії відносно точки контакту.

Кінетична енергія всієї системи при складному русі становить:

$$T_s = \frac{1}{2} I_o w^2 + \frac{1}{2} m_s {v_m}^2\ , \tag{25}$$

де $I_o$ - момент інерції всієї системи відносно точки обертання;

$m_s$ - маса робочого органа очисника.

Момент інерції системи виражається наступним чином:

$$I_o = I_{ol} + I_{op} + I_{om}\ . \tag{26}$$

Складова, що описує момент інерції лопатей $I_{ol}$ визначається за виразом:

$$I_{ol} = n \int r^2 dm, dm = \rho_l dV\ , \tag{27}$$

де $\rho_l$ - густина матеріалу лопаті.

Враховуючи те, що лопать має прямокутний перетин та постійну густину матеріалу $\rho_l$, момент інерції лопатей матиме вигляд:

$$I_{ol} = n\left(r^3/3\right) B \delta_l \rho_l\ , \tag{28}$$

© Лінник А.Ю., Фльонц О.В.

де $\delta_l$ - товщина лопаті.

Складова, що описує момент інерції прутків $I_{op}$ визначається наступним чином:

$$I_{op} = 2n\int R^2 dm, dm = \rho_p dV, \tag{29}$$

де $\rho_p$ - густина матеріалу прутка.

Складова моменту інерції, що характеризує прутки постійного круглого перетину $d$, кількість яких вдвічі більша за кількість лопатей матиме вигляд:

$$I_{op} = 2n\left(R^3/3\right)\left(\pi d^2/4\right)\ \rho_p. \tag{30}$$

Складова моменту інерції маточини $I_{om}$ та частин опор робочого органу, що обертаються, мають незначну величину у порівнянні з моментами інерції лопатей та прутків через малий радіус, крім того, оскільки суттєво змінити його конструктивні параметри не можливо, то ним можна знехтувати, або прийняти за постійну величину.

Кінетична енергія всієї системи при складному русі робочого органу в розгорнутому вигляді становить:

$$T_s = \frac{1}{2}(m_{po} + m_m){v_m}^2 + \frac{1}{2}I_{om}w^2 + \frac{1}{2}w^2\left(2n\frac{R^3}{3}\rho_p\frac{\pi d^2}{4} + n\frac{r^3}{3}\rho_l\delta_l B\right), \tag{31}$$

де $m_{po} = 2nR\rho_p\frac{\pi d^2}{4} + n\frac{r}{3}\rho_l\delta_l B$ - маса робочого органа без врахування маси маточини та підшипникових вузлів.

Кінетична енергія системи, приведена до точки контакту лопаті з головкою коренеплоду, становить:

$$T_k = \frac{1}{2}{v_l}^2 M_l, \tag{32}$$

де $M_l$ - маса системи, приведена до точки контакту.

Підставивши в вираз (31) значення $w$ та $v_m$ з (20), (22) та прирівнявши вирази (31) та (32), можна отримати приведену до точки контакту масу системи:

$$M_l = \frac{12\pi^2 I_{om} + n\left(3B^2 n m_m + 3B^2 n m_{po} + 4\pi^2 r^3\delta_l\rho_l + 2d^2\pi^3 R^3\rho_p\right)}{3\left(B^2n^2 + 4\pi^2 r^2\right)}. \tag{33}$$

За умов абсолютно жорсткої лопаті сила удару по головці коренеплоду визначиться виразом (24) з урахуванням (33).

У випадку, коли лопать деформується при ударі по головці коренеплоду частина кінетичної енергії лопаті буде витрачатися на деформування самої лопаті (прогин). При цьому, потенціальна енергія прогину становить:

$$U = \frac{1}{2}\int_{r_0}^{r}\frac{M^2(z)}{E\,I}dz, \tag{34}$$

де $I = \frac{B\delta^3}{12}$ - момент інерції поперечного перетину лопаті;

$r_0, r$ - радіус початку та кінця лопаті;

$E$ - модуль пружності матеріалу лопаті.

Кінетична енергія удару лопаті по головці коренеплоду становитиме різницю між повною кінетичною енергією та потенціальною енергією згину лопаті:

$$T = \frac{1}{2}{v_l}^2 M_l - \frac{6F^2(r-r_0)^3}{BE\delta^3}. \tag{35}$$

В кінцевому вигляді кінетична енергія удару лопаті по коренеплоду з урахуванням втрати енергії на деформацію самої лопаті матиме вигляд:

$$T=\frac{\left(\begin{array}{l}2\pi^2 r^2 v_m^2\left(12\pi^2 I_{om}+\frac{1}{2}n\left(\begin{array}{l}6B^2 nm_m+2Br\left(3B^2n^2+4\pi^2r^2\right)\delta_l\rho_l+\\+d^2\pi R\left(3B^2n^2+4\pi^2R^2\right)\rho_p\end{array}\right)\right)\times\\\left(\begin{array}{l}B^5n^4+4B^3n^2\pi^2r^2-\\-\frac{1}{E\delta_l^3}\left(8\pi^2\left(r-r_0\right)^3 v_m^2\left(24\pi^2 I_{om}+n\left(\begin{array}{l}6B^2nm_m+2Br\left(3B^2n^2+4\pi^2r^2\right)\delta_l\rho_l+\\+d^2\pi R\left(3B^2n^2+4\pi^2r^2\right)\rho_p\end{array}\right)\right)\right)\end{array}\right)\end{array}\right)}{\left(3B^5n^4\left(B^2n^2+4\pi^2r^2\right)^2\right)}. \quad (36)$$

Залежність (36) дозволяє визначити динамічні навантаження на головку коренеплоду в залежності від конструктивних та кінематичних параметрів очисника та матеріалів, що можуть застосовуватись для виготовлення його лопатей та пальців.

**Висновки.** На основі проведеного аналізу встановлені граничні значення сили, що може діяти на головку коренеплоду в залежності від його геометричних розмірів та розмірів залишку гички, а також їх механічних властивостей (модулів пружності та коефіцієнтів Пуассона) для забезпечення руйнування залишків гички без пошкодження тіла коренеплоду. Для забезпечення виконання умов руйнування залишків гички без пошкодження головки коренеплоду визначені залежності динамічної дії бияка робочого органу в залежності від конструктивних параметрів та кінематичного режиму роботи доочисника.

**Інформаційні джерела**

1. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. – М.: Мир, 1989. – 510 с.

2. Галин Л.А. Контактные задачи теории упругости и вязкоупругости. – М.: Наука, 1980. – 304 с.

3. Свеклоуборочные машины: история, конструкция, теория, прогноз. Л.В. Погорелый, Н.В. Татьянко. – К.: Феникс, 2004.-232с.

4. Хелемендик М.М. Напрями і методи розробки робочих органів сільськогосподарських машин.-К.: Аграрна наука, 2001. – 280с.

5. Ліннік А. Визначення динамічних параметрів жорсткого очисника при взаємодії з коренеплодом Вісник Тернопільського національного технічного університету – 2014. №1(73) – С. 165–171

6. Ліннік А. Обґрунтування конструкції апарату для очищення голівок коренеплодів цукрових буряків. Вісник аграрної науки Причорномор'я – Миколаїв: МНАУ. –2014 - № 2 (78). – С.200-205

**Линник А.Ю., Фльонц О.В.**
Отделенное подразделение Национального университета биоресурсов и природопользование Украины "Бережанський агротехнический институт"

## ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИКО-ДИНАМИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ ОЧИСТИТЕЛЯ С КОРНЕПЛОДОМ

*Снижение себестоимости сахарного сырья наряду с повышением его качества позволит поддерживать и повысить конкурентоспособность украинских производителей сахара на международном уровне, а также будут созданы предпосылки для снижения стоимости конечного продукта на внутреннем рынке. Одним из путей достижения этой цели выступает применение таких технических решений при производстве сырья которые обеспечат снижение затрат труда и энергоемкость процессов производства.*

*В статье рассмотрено взаимодействие очистителя с головкой корнеплода сахарной свеклы с целью исследования динамических показателей очистителя с учетом механических свойств тела головки корнеплода и остатков ботвы, а также их геометрических размеров. Пределы допустимой нагрузки со стороны рабочего органа очистителя на головку корнеплода исходя из условий не повреждения корня, но разрушение остатков ботвы определенно рассмотрев контактную задачу взаимодействия поверхности очисника-головка корнеплода остаток ботвы. Для анализа динамики взаимодействия, а именно определение усилий, которые действуют на поверхность корнеплода и остатки ботвы, а следовательно и напряжений на поверхности контакта очистителя с корнем определены кинематические показатели концов*

**© Ліннік А.Ю., Фльонц О.В.**

*лопастей и прутков очистителя. Кроме того, условия качества выполнения процесса очистки головок корнеплодов будут зависеть от кинематического режима работы очистителя, который обеспечит условие отсутствия пропусков контакта лопасть-поверхность головки корнеплода и обеспечит минимальное повреждение корешей за счет повторного контакта лопастей очистителя с корнем. Получена величина отношения переносной и угловой скоростей очистителя, которая обеспечивает отсутствие пропусков контакта лопастей очистителя с головкой корнеплода что является коэффициентом кинематического режима работы ротационного очистителя с осью вращения параллельной к направлению переносной поступательной скорости.*

*Анализ динамических и кинематических параметров работы очистителя позволяет выбрать рациональные параметры работы машины исходя из конструктивных особенностей рабочих органов, агрофизических свойств контактирующих тел и характеристик агрофона.*

**Ключевые слова:** *ботва, остатки ботвы, корнеплод, очистка, пятно контакта, модуль упругости, критерий разрушения Треска.*

**Linnik A.,. Flonts O.**
Separated Subdivision of National University of Life and Environmental
Sciences of Ukraine Berezhany Agrotechnical institute

## INVESTIGATION OF THE KINEMATIC AND DYNAMIC RELATIONSHIPS OF THE CLEANER WITH THE ROOT CROP

*Reducing the cost of sugar raw materials along with improving its quality will help maintain and increase the competitiveness of Ukrainian sugar producers at the international level, as well as create prerequisites for reducing the cost of the final product in the domestic market. One of the ways to achieve this goal is the use of such technical solutions in the production of raw materials that will reduce labor costs and energy consumption of production processes.*

*In the article, co-operating of purifier is considered with the head of root crop of sugar beet with the purpose of research of dynamic indexes of purifier taking into account mechanical properties of body of head of root crop and bits and pieces of tops, and also their geometrical sizes. Limits of the possible loading from the side of working organ of purifier on the head of root crop coming from terms not damages of root, but destruction of bits and pieces of tops certainly considering pin task of co-operation of surface очисника-головка of root crop remain of tops. For the analysis of dynamics of co-operation, namely determination of efforts that operate on the surface of root crop and bits and pieces of tops, and consequently and tensions on the surface of contact of purifier with a root the kinematics indexes of ends of blades and прутков are certain. In addition, quality of implementation of process of cleaning of root crops will depend on the kinematics mode of operations of purifier that will provide the condition of absence of admissions of contact surface of head of root crop and will provide the minimum damage of chums due to the repeated contact of blades of purifier with a root. The size of relation is got portable and angular speeds of purifier, that provides absence of admissions of contact of blades of purifier with the head of root crop that is the coefficient of the kinematics mode of operations of rotary purifier with the axis of rotation parallel to direction portable forward*

*The analysis of dynamic and kinematics parameters of work of purifier allows to choose the rational parameters of work of machine coming from the structural features of working organs, agrophysics properties of contacting bodies and field descriptions.*

**Keywords***: tops, bits and pieces of tops, root crop, cleaning, spot of contact, module of resiliency, a criterion of destruction is Tresk.*

**© Лінник А.Ю., Фльонц О.В.**

УДК 621.822.681.2:369.64
**[1]Марчук В.І., [1]Марчук І.В., [2]Джугурян Т.Г., [1]Карпюк В.О.**
Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна
Щецінська морська академія, Польща

# ПРО ДОЦІЛЬНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ШЛІФУВАЛЬНИХ КРУГІВ З ПЕРЕРИВЧАСТИМ ПРОФІЛЕМ НА ОПЕРАЦІЯХ БЕЗЦЕТРОВОГО ШЛІФУВАННЯ ПОВЕРХОНЬ ОБЕРТАННЯ

*В роботі зроблено порівняльний аналіз роботи шліфувальних кругів з суцільною і переривчастою робочою поверхнею для фінішної абразивної обробки поверхонь кілець роликопідшипників. Для фінішної абразивної обробки поверхонь кілець роликопідшипників показано, що результати очікуваної контактної температури, шорсткості і інтенсивності зношування при заданій інтенсивності знімання металу підтверджуються теоретичними розрахунками. Одержані результати дають змогу зробити висновок, що на операціях безцентрового шліфування, особливо при обробці кілець роликопідшипників, доцільно використовувати шліфувальні круги з переривчастою поверхнею.*

***Ключові слова:*** *шліфувальний круг, абразивний інструмент, безцентрове шліфування, переривчастий профіль, розмірне зношення, температура в зоні різання, поверхні обертання.*

**Постановка проблеми.** З метою підвищення показників якості та стабілізації параметрів точності деталей підшипників у сучасному машинобудуванні використовуються прогресивні методи механообробки такі, як шліфування кругами з переривчастим профілем. Найрозповсюдженішими представниками таких деталей в підшипниковому виробництві є внутрішні та зовнішні кільця підшипників. Застосування переривчастого шліфувальня дозволяє зменшити температуру в зоні шліфування на 15 – 25 % та підвищити ефективність фінішних шліфувальних операцій. Однак цей спосіб шліфування супроводжується складними динамічними процесами, що пов'язані з можливим виникненням дисбалансу шліфувальних кругів.

**Основне завдання та одержані результати роботи.** Метою дослідження є зробити порівняльний аналіз і теоретичну перевірку ефекту роботи шліфувальних кругів з переривчастим та суцільним профілем та на операціях безцентрового шліфування.

Згідно [1] застосування на операціях шліфування абразивного інструменту з переривчастим профілем дозволяє вдосконалити режими обробки при забезпеченні необхідних фізико-механічних властивостей оброблюваної поверхні. За рахунок періодичного переривання процесу різання температура в зоні контакту абразивної поверхні з матеріалом деталі зменшується і одночасно в технологічній системі збуджуються високочастотні коливання, зменшуючи енергоємність усього процесу оброблення в результаті дослідження.

Як показано в результатах [2-4], при шліфуванні абразивним інструментом з переривчастою робочою поверхнею присутнє поєднання ефекту від періодичного переривання процесу різання (в зоні контакту абразивних зерен з матеріалом деталі температура не досягає квазістаціонарного стану) з ефектом сталого загострення рельєфу круга надає змогу зменшення теплонапруженості процесу оброблення. Математична модель процесу шліфування поверхонь кругом з переривчастим профілем і розрахункові дані її залежності наводяться в [1].

Для перевірки запропонованих методик розрахунку параметрів абразивного інструменту з переривчастою робочою поверхнею і режимів оброблення виконані розрахунки і побудовані графіки залежності: очікуваної контактної температури, шорсткості і інтенсивності зносу від заданої інтенсивності знімання металу (рис.1) [4].

Розрахунки проводилися для шліфування заготовки із гартованої сталі Х12Ф1 (HRC 60 ... 64). Порівнянні види інструменту: шліфувальний круг з суцільною робочою поверхнею тип 1 300х40х127 25AF40LV і шліфувальний круг з переривчастою робочою поверхнею тип 1 300х40х127 25AF40LV (10 пазів завдовжки $l_1 = l_2$ = 47 мм які розташовані під кутом до вісі кола $\alpha$ = 15 °). Прийняті вихідні дані: діаметр шліфувального круга, D = 0,30 м; площа оброблюваної поверхні $F_{заг}$=8·$10^{-3}$ ·$м^2$; глибина різання $t$ = 0.02 мм/дв.хід; коефіцієнт температуропровідності 3·$10^6$ ·$м^2/с$; коефіцієнт теплопровідності $\lambda$ = 16,7 Вт/(°С·$м^2$); радіус заокруглення абразивного зерна $\rho_g$=1.45· $10^{-5}м$; коефіцієнт стружко утворення $K_c = 0{,}9$;

© Марчук В.І., Джугурян Т.Г., Марчук І.В., Карпюк В.О.

швидкість заготовки $V_u = 0.1\ м/с$ ; $V_k$ – швидкість круга, 35м/с; зернистість круга, $\bar{x}$ =40 мкм; $n_g$ – середня кількість вершин зерен на одиницю поверхні робочого шару, $\eta$=0,3; $m$ – об'ємна концентрація зерен круга, $m$=0,5;

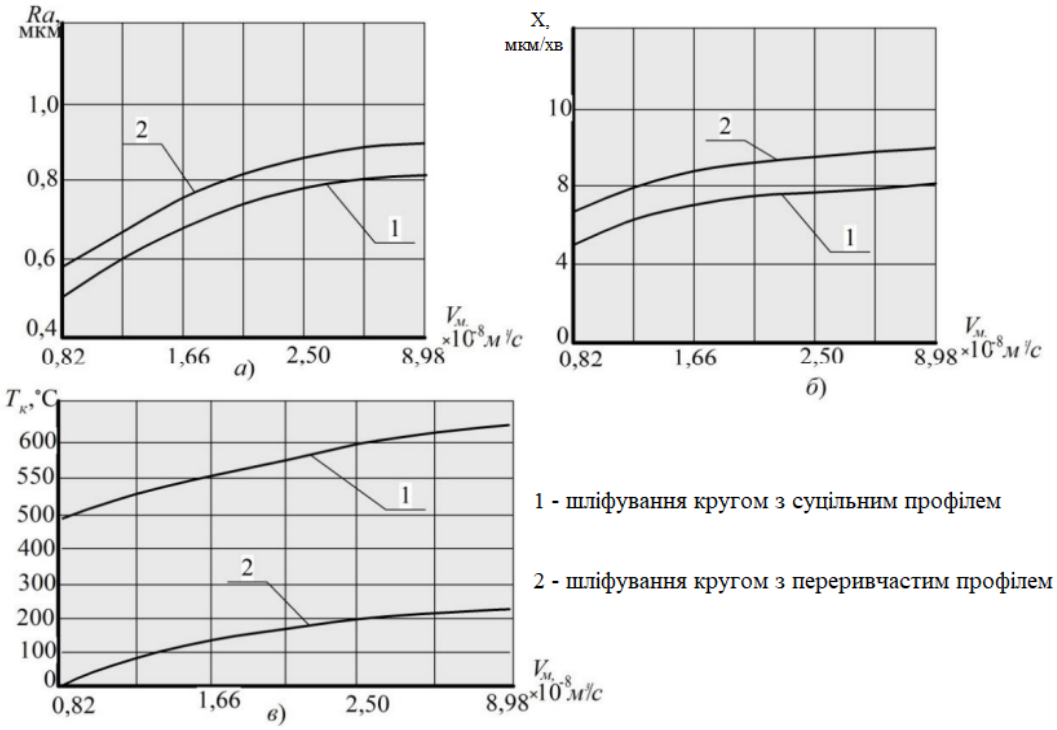



Рис. 1. Порівняльні результати розрахунків процесу шліфування кругами з суцільною (1) та з переривчастою (2) робочою поверхнею від заданої інтенсивності знімання металу: *а* – шорсткість поверхні; *б* – інтенсивність зносу; *в* – контактна температура.

Розрахунки проводилися для шліфування заготовки із гартованої сталі Х12Ф1 (HRC 60 ... 64). Порівнянні види інструменту: шліфувальний круг з суцільною робочою поверхнею тип 1 300х40х127 25AF40LV і шліфувальний круг з переривчастою робочою поверхнею тип 1 300х40х127 25AF40LV (10 пазів завдовжки $l_1 = l_2$ = 47 мм які розташовані під кутом до вісі кола $\alpha$ = 15 °). Прийняті вихідні дані: діаметр шліфувального круга, D = 0,30 м; площа оброблюваної поверхні $F_{заг}$=$8{\cdot}10^{-3} \cdot м^2$; глибина різання $t$ = 0.02 мм/дв.хід; коефіцієнт температуропровідності $3{\cdot}10^{6} \cdot м^2/с$; коефіцієнт теплопровідності $\lambda$ = 16,7 Вт/(°С·$м^2$); радіус заокруглення абразивного зерна $\rho_g$=$1.45{\cdot}\ 10^{-5} м$; коефіцієнт стружко утворення $K_c = 0{,}9$; швидкість заготовки $V_u = 0.1\ м/с$ ; $V_k$ – швидкість круга, 35м/с; зернистість круга, $\bar{x}$ =40 мкм; $n_g$ – середня кількість вершин зерен на одиницю поверхні робочого шару, $\eta$=0,3; $m$ – об'ємна концентрація зерен круга, $m$=0,5;

Необхідно визначити: шорсткість обробленої поверхні, розмірне зношення кола в одиницю часу, контактну температуру і інтенсивність знімання металу. Нижче наведені приклади виконання розрахунків зазначених характеристик. [3, 5]

Фактична глибина різання:

$$t_f = \sqrt{\frac{D^2}{2} - \left(\sqrt{D \cdot t} - \frac{V_u}{V_k}(l_1 + l_2)\right)^2} - \left(\sqrt{\frac{D^2}{2} - D \cdot t}\right)$$

$$= \sqrt{0.5 \cdot 0.3^2 - \left(\sqrt{0.3 \cdot 0.02 \cdot 10^{-3}} - \frac{0.1}{35} \cdot (0.04 + 0.0255)\right)^2} -$$

$$-\sqrt{0.5 \cdot 0.3^2 - 0.25 \cdot 0.02 \cdot 10^{-3}} = 5.24 \cdot 10^{-6} м.$$

© Марчук В.І., Джугурян Т.Г., Марчук І.В., Карпюк В.О.

Очікуване середньоарифметичне значення відхилення профілю і швидкості зносу круга вираховуємо за формулами [3, 5]:

$$R_a = \frac{0{,}25 \cdot V_u^{0.4} \cdot \left( \sqrt{\frac{D^2}{2} - \left( \left(\sqrt{Dt}\right) - \frac{V_u}{V_k}(l_1 + l_2) \right)^2} - \left( \sqrt{\frac{D^2}{2} - Dt} \right) \right)^{0.6}}{K_c^{0.6} \cdot (V_k \pm V_u)^{0.4} \cdot n_g^{0.4} \cdot D^{0.2} \cdot \rho_g^{0.2}}$$

$$= \frac{0.25 \cdot 0.1^{0.4} \cdot (5.24 \cdot 10^{-6})^{0.6}}{0.9^{0.6} \cdot (35 + 0.1)^{0.4} \cdot 5.2^{0.4} \cdot 0.3^{0.2} \cdot (1{,}45 \cdot 10^{-5})^{0{,}2}} = 0{,}93 мкм$$

Інтенсивність знімання металу [6, 7, 15]:

$$V_m = \frac{0{,}02 \cdot t \cdot V_u \cdot F_{заг}}{B} = \frac{0.02 \cdot 5.24 \cdot 10^{-6} \cdot 0.1 \cdot 8 \cdot 10^{-3}}{12} = 6.987 \cdot 10^{-8}\, м^3/с$$

Контактна температура [4, 5]:

$$T = 2.04 \cdot A \cdot \left[ \frac{tgy \cdot m \cdot V_u \cdot t^{3.5} \cdot (1 + \eta) \cdot V_k \cdot \left(1 + \frac{l_2}{l_1}\right)^3}{\lambda^2 \cdot C^2 \cdot \rho_g^2 \cdot \bar{x}^2 \cdot (1 - \eta)^2} \right]^{0.25} =$$

$$= 2.04 \cdot 17.1 \cdot \left[ \frac{1 \cdot 0.5 \cdot 0.1 \cdot (0.05 \cdot 10^{-3})^{3.5} \cdot (1 + 0.3) \cdot 35 \cdot \left(1 + \frac{25.5}{40}\right)^3}{16.7^2 \cdot (5.57 \cdot 10^{-8})^2 \cdot 99.998^2 \cdot (40 \cdot 10^{-6})^2 \cdot (1 - 0.3)^3} \right]^{0.25} = 209.34$$

Розмір лінійного зносу максимально виступаючого зерна [4]:

$$X = \sqrt[3]{\frac{1444.4 \cdot V_u \cdot \left(1 + \frac{l_2}{l_1}\right) \cdot \sqrt{\frac{2t}{R}} \cdot \bar{x}^3 \cdot \eta^3}{m \cdot V_k \cdot \mathrm{tg}\gamma \cdot (1 - \eta^2)}} =$$

$$= \sqrt[3]{\frac{1444.4 \cdot 0.1 \left(1 + \frac{0.0255}{0.04}\right) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 0.05 \cdot 10^{-3}}{0.125}} \cdot (40 \cdot 10^{-6}) \cdot 0.3^3}{0.5 \cdot 35 \cdot 1 \cdot (1 - 0.3^2)}} = 8.98\ {}^{мкм}/_{мін}$$

Виконані розрахунки демонструють, що в рівних умовах абразивний круг з переривчастою робочою поверхнею порівняно з кругом із суцільною робочою поверхнею зменшує температуру в зоні контакту ($\Delta T_{кмах}$ = -30%) при зміні інтенсивності знімання металу 0,8 – 8,98$\cdot 10^{-8}\, м^3/с$, що дає змогу збільшення продуктивності обробки приблизно на 40 – 50%. В цьому випадку деяке зростання шорсткості і швидкості розмірного зносу при шліфуванні кругом з переривчастою робочою поверхнею можна пояснити тим, що в умовах більш інтенсивного самозаточування зменшується кількість зерен на одиниці робочої поверхні круга з переривчастою робочою поверхнею, а також зменшується розмір площадок зносу на їх вершинах, що призводить до збільшення глибини проникнення абразивних зерен в метал. Однак, при цьому умови мікрорізання абразивними зернами покращуються, вимагаючи на знімання металу в одиницю часу менших енергетичних затрат, а зменшення висоти шорсткості при необхідності досягається відповідним зменшенням зернистості і збільшенням твердості круга, а також досягається зниження розмірного зносу. При цьому переривчаста робоча поверхня абразивного інструменту дозволяє вести обробку в області допустимих контактних температур. Зниження теплонапруженості при шліфуванні такими кругами дає можливість інтенсифікувати режими обробки без небезпеки виникнення припалів на оброблюваних поверхнях.

Порівняння можливостей, та перевірка експлуатаційних показників шліфувального круга з переривчастою робочою поверхнею і шліфувального круга з суцільною робочою поверхнею наведені на рис. 2 та 3. Дані результати порівняльного дослідження фізико-механічного стану поверхневого шару обробленої кругами з переривчастою робочою поверхнею та з суцільною робочою поверхнею показали, що в тонкому поверхневому шарі збільшується мікротвердість (рис. 3, а) і з'являються залишкові напруження стиснення (рис. 3, б). Особливістю змін фізико механічних властивостей по глибині є відсутність шару зі зниженою мікротвердістю. При шліфуванні звичайними кругами його поява обумовлена структурними перетвореннями, що виникають при високих температурах в зоні контакту. При шліфуванні кругами з переривчастою робочою поверхнею зменшується час контакту перетину поверхні з

інструментом до (1,6 – 3,5) $\cdot 10^{-4}$с , швидкість нагріву і охолодження поверхневого шару до (2,1 ... 3.6) $\cdot 10^{6}$ ° С / с. При таких швидкостях термічних процесів виникнення відпущеного шару малоймовірно.

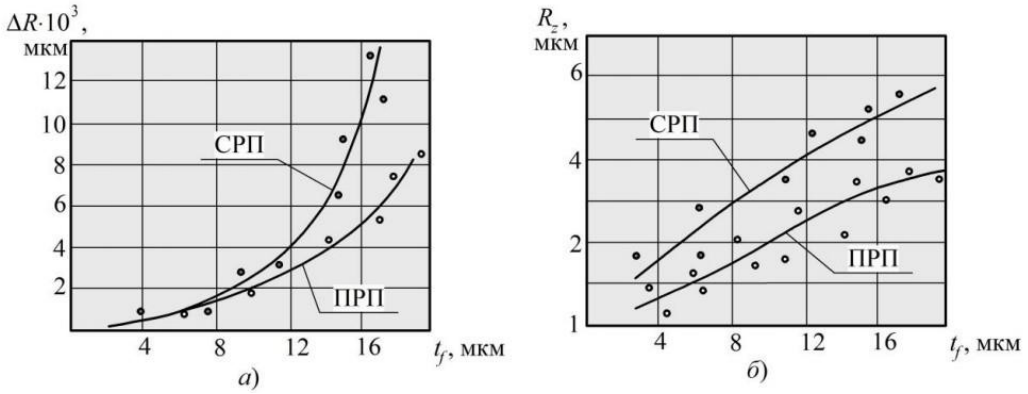



Рисунок 2. Перевірка зносу шліфувального круга (*а*) і шорсткості оброблювальної поверхні (*б*) для кругів з суцільною робочою поверхнею (СРП) та переривчастою робочою поверхнею (ПРП).

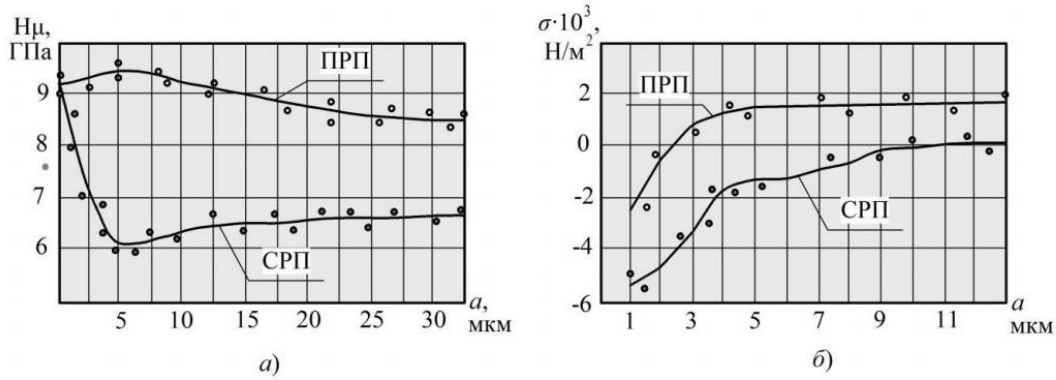



Рисунок 3. Розподілення мікротвердості (*а*) і залишкових напружень (*б*) в поверхневих шарах зразків.

**Висновок.** Після проведення теоретичних досліджень, та порівнянь отриманих результатів можна зробити висновок про доцільність застосування на операціях безцентрового шліфування шліфувальних кругів з переривчастим профілем. При проектуванні безцентрових шліфувальних операції технологу з метою забезпечення заданої якості поверхневого шару оброблюваної поверхні та збільшення швидкості виготовлення продукції, слід попередньо вивчити методику розрахунків і потім виконати розрахунок геометричних параметрів переривчастого профілю круга, також провести розрахунок режимів високопродуктивного шліфування. А також враховувати особливості динаміки процесу шліфування. Для технологічної підготовки шліфувальних операцій важливим є розробка методики моделювання динамічних процесів з метою прогнозування впливу динаміки шліфування на показники якості шліфованих поверхонь.

**Інформаційні джерела**

1. Якимов, А. В. Прерывистое шлифование / А. В. Якимов. – К.: Вища школа, 1986. – 175 с
2. Лищенко, Н. В. Температура при шлифовании прерывистыми и высокопористыми кругами / Н. В. Лищенко, В. П. Ларшин // Вектор науки ТГУ. – 2015. – № 3-1.– С. 75-84.
3. Якімов О.В., Марчук В.І., Лінчевський П.А., Якімов О.О., Ларшин В.П. Технологія машино- та приладобудування: Підручник. – Луцьк: РВВ ЛДТУ, 2005. – 712 с.
4. Марчук В.І., Марчук І.В, Гринюк С.В., Сачковська Л.О. Моделювання процесу безцентрового шліфування робочих поверхонь кілець роликопідшипників в умовах серійного виробництва // Наукові нотатки: Міжвузівський збірник (за галузями знань «Технічні науки») - Луцьк: Луцький НТУ, 2019. Вип. 66. - С. 234-239
5. Марчук В.І., Гринюк С.В., Сачковська Л.О. Динамічна модель процесу шліфування переривчастими кругами // Збірник наукових праць «Перспективні технології та прилади». - Луцьк: Луцький НТУ, 2020. - №16. - С.33-37

© **Марчук В.І., Джугурян Т.Г., Марчук І.В., Карпюк В.О.**

**[1]Marchuk V.I., [1]Marchuk I.V., [2]Dzhuguryan T.G., [1]Karpyuk V.O.**
[1]Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine
[2]Szczecin Maritime Academy, Poland

## ON THE EXPEDIENCY OF APPLICATION OF GRINDING WHEELS WITH A BROKEN PROFILE IN OPERATIONS OF CENTER-FREE GRINDING OF ROTARY SURFACES

*The comparative analysis of the work of grinding wheels with a continuous and intermittent working surface for finishing abrasive treatment of the surfaces of roller bearing rings is made in the work. For the finishing abrasive treatment of the surfaces of the roller bearing rings, it is shown that the results of the expected contact temperature, roughness and wear intensity at a given intensity of metal removal are confirmed by theoretical calculations. The obtained results allow us to conclude that in centerless grinding operations, especially when machining roller bearing rings, it is advisable to use grinding wheels with an intermittent surface.*

**Key words:** grinding wheel, abrasive tool, centerless grinding, intermittent profile, dimensional wear, temperature in the cutting zone, surface of rotation.

**[1]Марчук В.И., [1]Марчук И.В., [2]Джугурян Т.Г [1]Карпюк В.О.**
[1]Луцкий национальный технический университет, г. Луцк, Украина
[2]Щецинская морская академия, Польша

**© Марчук В.І., Джугурян Т.Г., Марчук І.В., Карпюк В.О.**

УДК 004.9
**В.І. Марчук, Ю.Й. Тулашвілі, Ю.А. Лук'янчук**
Луцький національний технічний університет

# ОСОБЛИВОСТІ ПІДГОТОВКИ ФАХІВЦІВ ІНЖЕНЕРНИХ СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ ЗА ДОПОМОГОЮ АДИТИВНИХ ІТ-ТЕХНОЛОГІЙ

*В даній статті описано використання адитивних технологій, яке використовують під час підготовки фахівців інженерних спеціальностей. На виробництві користуються сучасними засобами для виготовлення деталей різних форм складності на основі 3D-друку, що, у свою чергу, зменшує витрати часу на впровадження нового або переналагодження вже існуючого обладнання. Існує необхідність формування у майбутніх кваліфікованих робітників ІТ-сфери компетентності в галузі 3D-моделювання та 3D-друку у процесі професійної підготовки за допомогою програмного забезпечення, що моделює технологічний процес. Вивчення методології та основ 3D-друку для сучасного виробництва і підвищення конкурентоспроможності майбутніх кваліфікованих робітників ІТ-сфери на ринку праці є доцільним для майбутнього інформаційного суспільства.*

**Ключові слова:** *3D-технології, тривимірний друк, програмне забезпечення, пряме лазерне спікання (DMLS).*

Сучасне інформаційне суспільство все більше спирається на використання автоматизованого і роботизованого обладнання, технологій швидкого прототипування (таких як 3D-друк) і програмних засобів конструювання технічних об'єктів. Сьогодні ІТ-індустрія потребує кваліфікованих фахівців, що володіють сучасними технологіями, засобами, обладнанням. Серед таких – спеціаліст, що створює на комп'ютері моделі виробів, після чого вони виготовляються на автоматизованому обладнанні. Спеціаліст такого профілю – людина креативна, що критично мислить, володіє винахідливістю, спеціальними знаннями та уміннями.

В умовах сучасного ринку і постійного зростання конкуренції якнайшвидше створення інноваційного продукту є життєво важливим для успішного розвитку будь-якого підприємства. Світові виробники розуміють, що в сучасному світі, щоб бути на лідируючих позиціях, потрібно максимально оперативно втілювати нові ідеї в працездатні рішення. Це неможливо без генерації цих ідей і без нових технічних рішень для якнайшвидшого їх втілення в життя [1]. Тому використання технології 3D-друку буде одним з кращих технічних рішень для прискорення реалізації різних нових ідей в життя. А процес моделювання технологічних процесів стане корисним при розробці нових продуктів, оскільки віртуально можливо побачити увесь життєвий цикл виготовлення та вносити корективи у роботу обладнання [2, 3].

У зв'язку з цим актуальним є питання формування у майбутніх кваліфікованих робітників ІТ-сфери компетентності в галузі 3D-моделювання та 3D-друку у процесі професійної підготовки за допомогою програмного забезпечення, що моделює технологічний процес. Для забезпечення формування зазначеної компетентності та, як наслідок, підвищення конкурентоспроможності майбутніх кваліфікованих робітників ІТ-сфери на ринку праці доцільним є вивчення основ 3D-друку.

Свої професійні навички за допомогою 3D-технології можуть удосконалювати майбутні інженери, дизайнери, архітектори, медики та студенти багатьох інших спеціальностей [4, 5].

Адитивне виробництво, або 3D-друк, - процес створення тривимірних об'єктів практично будь-якої геометричної форми на основі їх цифрових моделей. Концепція 3D-друку заснована на побудові об'єкта послідовно нанесеними шарами, що відображують контури моделі.

Адитивні технології широко використовуються для прототипування і розподіленого виробництва в архітектурі, будівництві, промисловому дизайні, автомобільній, аерокосмічній, промисловій, інженерній та медичній галузях, біоінженерії (для створення штучних тканин), виробництві модного одягу та взуття, ювелірних виробів, в освіті, географічних інформаційних системах, харчовій промисловості та багатьох інших сферах людської діяльності.

Технологічні особливості процесу тривимірного друку, що головним чином залежать від технології адитивного виробництва, лежить в основі цього процесу [6,7]. Класифікація основних методів і технологій, що застосовуються в тривимірному друку на сьогоднішній день, представлено в таблиці 1.1.

**© В.І. Марчук, Ю.Й. Тулашвілі, Ю.А. Лук'янчук**

Таблиця 1.1

| Метод | Базова технологія | Матеріали, що використовуються |
|---|---|---|
| Екструзійний | Моделювання методом пошарового наплавлення (FDM, FFF) | Термопластичні полімери (поліактид (PLA), акрилонітрилбутадієнстирол (ABS)) |
| Дротовий | Виробництво довільних форм електронно-променевої плавки (EBF) | Майже всі металеві сплави |
| Порошковий | Пряме лазерне спікання (DMLS) | Майже всі металеві сплави |
| | Електронно-променева плавка (EBM) | Титанові сплави |
| | Вибіркове лазерне плавлення (SLM) | Титанові сплави, кобальт-хромові сплави, нержавіюча сталь, алюміній |
| | Вибіркове теплове спікання (SHS) | Порошкові термопластичні полімери |
| | Вибіркове лазерне спікання (SLS) | Термопластичні полімери, металеві порошки, керамічні порошки |
| Струменевий | Струменевий тривимірний друк (3DP) | Гіпс, пластики, металеві порошки, піщані суміші |
| Ламінування | Виготолвення об’єктів методом ламінування (LOM) | Папір, металева фольга, пластикова плівка |
| Полімеризація | Стереолітографія (SLA) | Фотополімери |
| | Цифрова світлодіодна проекція (DLP) | Фотополімери |

Оскільки представлені в таблиці методи друку суттєво розрізняються по принципам, що лежать в їх основі, умовам застосовності, матеріалами, формою і функціональним призначенням виробів, одержуваних з їх допомогою, варто вивчати кожен з методів окремо.

Одним із найбільш поширених та затребуваних у високоточному виробництві, що спеціалізується на виготовлені виробів із точністю до 0,005мм, є метод прямого лазерного спікання для різних сфер промисловості. Вивчення цього методу є доцільним та актуальним, оскільки на сьогоднійшній день існує велика потреба у фахівцях ІТ-галузі, що здатні програмувати обладнання для виготовлення високоточних прототипів.

Пряме лазерне спікання металів (DMLS) - технологія адитивного виробництва металевих виробів, розроблена компанією EOS з Мюнхена. Технологія DMLS подібна із технологіями вибіркового лазерного спікання (Selective Laser Sintering, SLS) і вибіркового лазерного плавлення (Selective Laser Melting, SLM).

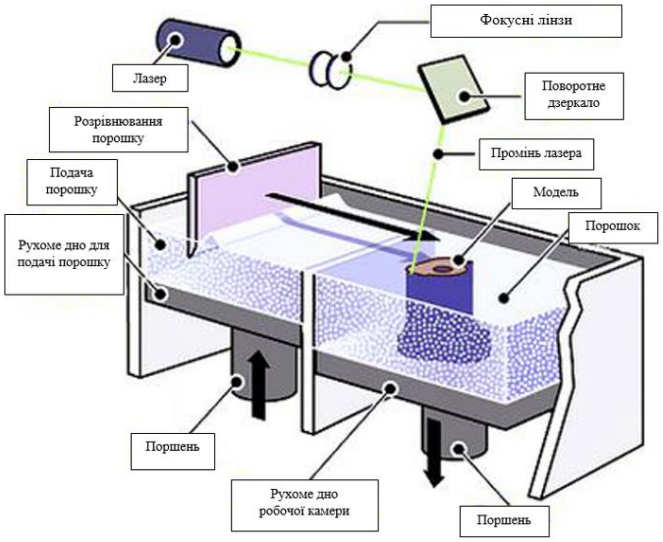



Рис. 1. Схема процесу прямого лазерного спікання

© **В.І. Марчук, Ю.Й. Тулашвілі, Ю.А. Лук’янчук**

Процес друку включає використання тривимірних моделей в форматі STL, як креслень, для побудови фізичних моделей. Тривимірна модель підлягає цифровій обробці для віртуального поділу на тонкі шари, товщина яких відповідає товщині шарів, що наносяться друкарським пристроєм. Готовий файл використовується як набір креслень під час друку. В якості нагрівального елементу для спікання металевого порошку використуються оптоволоконні лазери високої потужності – близько 200 Вт. Деякі пристрої використовують більш потужні лазери з підвищеною швидкістю сканування (тобто пересування лазерного променя) для більш високої продуктивності. Як варіант, можливе підвищення продуктивності за рахунок використання декількох лазерів.

Порошковий матеріал подається в робочу камеру в кількості, що необхідна для нанесення одного шару. спеціальний валик вирівнює поданий матеріал в рівний шар і видаляє зайвий матеріал з камери, після чого лазерна головка спікає частки свіжого порошку між собою і з попереднім шаром згідно контурів, відповідно до цифрової моделі. Після завершення окреслення шару процес повторюється: валик подає свіжий матеріал і лазер починає зпікати наступний шар. Особливістю цієї технології є дуже висока роздільна здатність друку - в середньому близько 20 мікрон. Для порівняння: типова товщина шару в побутових принтерах, що використовують технології пошарового наплавлення, становить близько 100 мікрон.

Іншою особливістю процесу є відсутність необхідності побудови опор для нависаючих елементів конструкції. Неспечений порошок не видаляється під час друку, а залишається в робочій камері. Таким чином, кожен наступний шар має опорну поверхню. Крім того, невитрачений матеріал може бути зібраний з робочої камери після завершення друку і використаний заново. Виробництво методом прямого лазерного спікання можна вважати фактично безвідходним, що важливо при використанні дорогих матеріалів, наприклад дорогоцінних металів.

Однією з важливих умов при лазерному друку є створення захисного середовища, що запобігає окисленню порошку. Для виконання цієї умови використовують аргон або азот. Однак застосування азоту як інертного газу дещо обмежено через можливість утворення нітридів (наприклад, нітриду алюмінію або титану при виготовленні виробів з алюмінієвих і титанових сплавів), які призводять до зниження пластичності матеріалу.

Технологія практично не має обмежень по геометричній складності побудови, а висока точність виконання мінімізує необхідність механічної обробки надрукованих виробів.

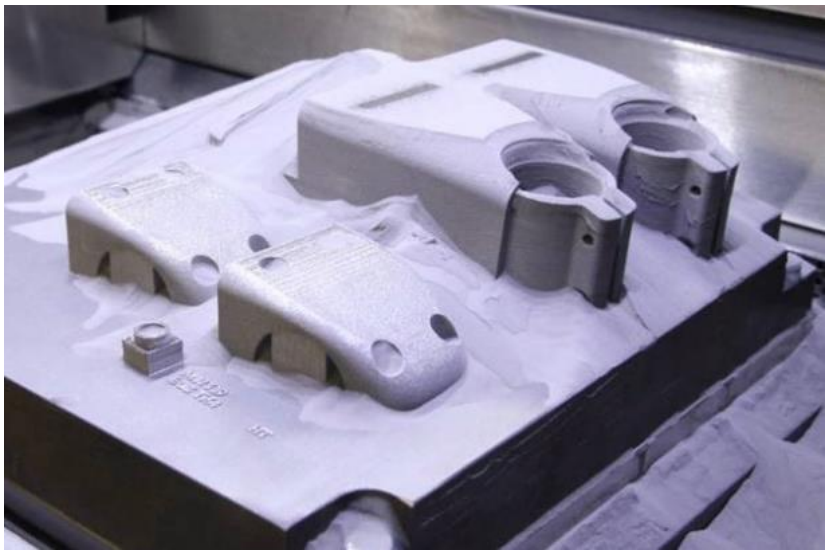


Рис. 2. Вироби отримані по технології прямого лазерного спікання

Технологія прямого лазерного спікання має декілька переваг в порівнянні з традиційними методами виробництва. Найбільш очевидною її перевагою є можливість швидкого виробництва геометрично складних деталей без механічної обробки. Виробництво є практично безвідходним. Технологія дозволяє створювати кілька моделей одночасно з обмеженням лише за розміром робочої камери. Побудова моделей займає приблизно кілька

© В.І. Марчук, Ю.Й. Тулашвілі, Ю.А. Лук'янчук

годин. З іншого боку, деталі, виготовлені лазерним спіканням, не мають монолітності, а тому не досягають тих же показників міцності, що і відлиті зразки або деталі.

Пряме лазерне спікання активно використовується в промисловості з огляду на можливості побудови внутрішніх структур цілісних деталей, недоступних за складністю традиційним методам виробництва. Деталі зі складною геометрією можуть бути виконані суцільними, а не зі складових частин, що позитивно впливає на якість і вартість виробів. Так як пряме лазерне спікання не потребує спеціальних інструментів і не передбачає утворення великої кількості відходів, виробництво дрібносерійних партій за допомогою цієї технології значно вигідніше, ніж традиційними методами.

Технологія прямого лазерного спікання застосовується для виробництва готових виробів малого і середнього розміру в різних галузях, включаючи аерокосмічну, стоматологічну, медичну та інші. Пряме лазерне спікання використовується для прототипування, що скорочує час розробки нових продуктів, а також у виробництві, що дозволяє зменшити собівартість дрібних партій і спростити складання виробів складної геометричної форми.

Північно-західний політехнічний університет Китаю використовує DMLS-системи для виробництва елементів конструкції літаків. Дослідження, проведені EADS, також вказують на зменшення собівартості та відходів при використанні технології DMLS для виробництва складних конструкцій в одиничних екземплярах або дрібними партіями. 5 вересня 2013 року Ілон Маск опублікував фотографії деталі ракетного двигуна Super Draco, що побудований з нікель-хромового жароміцного сплаву Inconel з принтера EOS.

Як витратні матеріали можуть використовуватися практично будь-які метали і сплави в порошковій формі. На сьогоднішній день успішно застосовується нержавіюча сталь, кобальт-хромові сплави, титан і інші матеріали.

Відповідно до дослідження використання адитивних технологій, можна зробити висновок про необхідність вивчення 3D моделювання та 3D друку майбутніми спеціалістами інженерних спеціальностей. Розвиток технологій спонукає до пришвидшеного вдосконалення навичок фахівців. Їх можна покращувати за допомогою різноманітних практик та досвіду провідних компаній у галузях застосування адитивних технологій.

**Література**

1. Доступная 3D-печать для науки, образования и устойчивого развития / Э. Канесса, К. Фонда, М. Зеннаро. Международный центр теоретической физики Абдус Салам. 2013. 191 с.

2. Зленко М.А. Нагайцев М.В., Довбыш В.М. Аддитивные технологии в машиностроении // пособие для инженеров. М. ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» 2015. 220 с.

3. История и технологии трехмерной печати / Н.В. Кушнир, А.В. Кушнир, А.М. Геращенко, А.В. Тыртышный // Научные труды КубГТУ. Краснодар: №5. 2015.

4. Применение 3D-принтеров в машиностроении. URL: http:// www.printcad.ru/primeneniya-3d-printerov/mashinostroenie.html.

5. Barnatt C. 3D-Printing: Second Edition / CreateSpace Independent Publishing Platform. 2014. 306 p.

6. Hausman K. 3D-Printing For Dummies / For Dummies. 2014. 384 p.

7. Larson H. Fabricated: The New World of 3D-Printing / H. Larson, M. Kurman – Wiley. 2013. 280 p.

**В.И. Марчук, Ю.Й. Тулашвили, Ю.А. Лукъянчук**
Луцкий национальный технический университет

## ОСОБЕННОСТИ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ ИНЖЕНЕРНЫХ ОТРАСЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ АДДИТИВНЫХ IT-ТЕХНОЛОГИЙ

*В данной статье описано использование аддитивных технологий, которое используют при подготовке специалистов инженерных отраслей. На производстве пользуются современными средствами для изготовления деталей различных форм сложности на основе 3D-печати, что, в свою очередь, уменьшает затраты времени на внедрение нового или переналадки уже существующего оборудования. Существует необходимость формирования у будущих квалифицированных рабочих IT-сферы компетентности в области 3D-моделирования*

**© В.І. Марчук, Ю.Й. Тулашвілі, Ю.А. Лук'янчук**

*и 3D-печати в процессе профессиональной подготовки с помощью программного обеспечения, моделирующего технологический процесс. Изучение методологии и основ 3D-печати для современного производства и повышение конкурентоспособности будущих квалифицированных рабочих IT-сферы на рынке труда целесообразно для будущего информационного общества.*

***Ключевые слова:*** *3D-технологии, трехмерная печать, программное обеспечение, прямое лазерное спекание (DMLS).*

**V. Marchuk, Y. Tulashvili, I. Lukyanchuk**
Lutsk National Technical University

## FEATURES TRAINING OF ENGINEERING SPECIALTIES WITH THE ADDITIVE IT TECHNOLOGIES

*This article describes the additive technologies used in the training of engineering specialists. The production uses modern tools for the manufacture of parts of various forms of complexity on the basis of 3D-printing, which, in turn, reduces the time spent on the introduction of new or reconfiguration of existing equipment. There is a need to form in future skilled IT workers competence in the field of 3D modeling and 3D printing in the process of training with the help of software that simulates the technological process. Studying the methodology and basics of 3D printing for modern production and increasing the competitiveness of future skilled IT workers in the labor market is appropriate for the future information society.*

***Keywords:*** *3D-technologies, three-dimensional printing, software, direct laser sintering (DMLS).*

**© В.І. Марчук, Ю.Й. Тулашвілі, Ю.А. Лук'янчук**

УДК 620.9+621.315
**Никируй Л.І.[1], Замуруєва О.В.[2], Федосов В.С.[2], Урбан О.А.[3], Захарчук Д.А.[3], Федосов С.А.[2]**
[1]Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника
[2]Волинський національний університет імені Лесі Українки
[3]Луцький національний технічний університет

## ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ БІОПАЛИВНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

*У роботі проаналізовано публікації авторитетних світових науковців і з двох сусідніх держав – України та Польщі у галузі біопаливної енергетики, щоб знайти закономірності як розвитку цього напрямку у світі і кожній державі зокрема, так і визначити перспективи для спільних досліджень. Аналіз ґрунтується на результатах даних, опублікованих у міжнародних наукових базах даних Web of Science та Scopus. Виявлено стан розвитку галузі у кожній країні, проаналізовано як теоретичні, так і прикладні дослідження, спрямовані на практичне застосування.*

***Ключові слова:*** *відновлювальні джерела енергії, енергія біопалива, біопаливо, біомаса, Україна, Польща, h-індекс.*

**Вступ.** Відсутність належної енергетичної політики серед держав, зокрема тих, економіка яких базується на викопних паливах, часто згубно впливає на навколишнє середовище. З цієї причини більшість держав розпочали підтримувати розвиток відновлювальних джерел енергії на законодавчому рівні та заохочувати перехід до їх широкого використання. Однак виклик такій політиці ЄС можливий через недотримання цих ініціатив державами, що межують з ЄС. Тому доцільним є аналіз розвитку відновлювальної енергетики у двох сусідніх країнах – Польщі та Україні.

Серед усіх відновлюваних енергетичних ресурсів одним з найбільш перспективних та стратегічно важливих є біоенергетичний ресурс. Роль та значення біоенергетики для розвитку економіки неодноразово підкреслювалося у доповідях вчених, експертів, практиків, усіх тих, хто так чи інакше займається енергетичними проблемами. Україна та Польща знаходяться в схожих широтах і мають майже однакову кількість сонячних днів та схожу інфраструктуру, включаючи наукову. Наукові інститути та університети цих країн приділяли значну увагу розвитку матеріалознавства для енергетики (науки про енергетичні матеріали). Біоенергетика є специфічною особливістю цих країн. Обидві країни мають розвинене сільське господарство, відходи якого є прямим джерелом біопалива або біогазу [1].

**Методологія досліджень.** Наукову літературу шукали в академічних бібліотеках, Web of Science, Scopus, яку рецензували англійською мовою та видавали книги. Відібрані наукові праці, що свідчать про приналежність Польщі чи України. Процедура детально описана в роботі [2]. Огляд джерел проводився на основі аналізу як найбільш важливих чи найбільш цитованих (сортування за кількістю цитат), так і останніх (сортування за датою).

**Аналіз результатів.** На відміну від сонячної енергетики, розвиток біоенергетики є більш специфічним і потребує наявності певних галузей економіки в країні. Україна та Польща, серед інших країн, вигідно відрізняються наявністю розвиненого сільського господарства. Відповідно, раціональна утилізація відходів біомаси із рослинництва та тваринництва є дуже важливим. У той же час, поряд з екологічним питанням, частково вирішується питання генерації відновлюваної електроенергії. У сільськогосподарських регіонах обох країн активно впроваджуються різні біогазові станції. Таким чином, існує інший підхід до цієї галузі відновлювальної енергії: реалії економіки вимагають її розвитку на новому, більш ефективному науковому рівні. А наявність спільного кордону та подібних географічних умов є фактором, що створює однакові технологічні умови для розвитку біоенергетики для обох країн.

Біоенергетика тісно пов’язана з поняттями «біомаса» та «біопаливо». Біомаса означає органічну речовину рослинного походження та відходи, отримані шляхом природного або штучного перетворення, які можуть бути використані в енергетичних цілях. Біопаливо – це поновлюване джерело енергії, отримане з рослинної або тваринної біомаси. Хоча в багатьох дослідженнях терміни «біомаса» та «біопаливо» використовуються взаємозамінно, ми вважаємо за доцільне їх диференціювати. Біомаса – це сировина. Тоді як біопаливо є продуктом переробки біомаси.

**© Никируй Л.І., Замуруєва О.В., Федосов В.С., Урбан О.А., Захарчук Д.А., Федосов С.А.**

Біопаливна енергія (включаючи агробіопаливо, біомасу тощо) відносяться до тих видів відновлювальної енергетики, який насьогодні успішно впроваджуються на практиці, має відповідні наукові обґрунтування та дослідження, але у кількості виробленої енергії суттєво поступаються сонячній та вітровій енергетикам [3]. Однак інформація про них є невід'ємною та важливою складовою частиною усіх сучасних оглядів та проектів [4]. Щодо біопаливної енергетики (Biofuel Energy), то спостерігаються дуже близькі значення між $R_1$ (за цитуванням) і $R_2$ (за останні роки) 0,99 і 0,98 відповідно [5] ( $R = N_{rel}/N$ – частка релевантних публікацій відповідно тематики відновлювальної енергетики від їх загальної кількості). Це свідчить про чітку тематичну спрямованість таких публікацій.

Біоенергетика насьогодні у світі є одним з невід'ємних і прогресивних напрямків відновлювальної енергетики. Хоча значно менша кількість робіт стосується біопаливної енергії у порівнянні із сонячною, вітровою чи гібридною енергією. Так за тегом «Biofuel Energy» h-індекс публікацій дорівнює 256 і 4 % загальної кількості публікацій за тематикою відновлювальної енергетики [2, 5]. Але існує досить потужна практична реалізація. Тобто, на ринку є велика кількість гравців, які комерційно впроваджують ці напрямки, користуючись великими підтримками на рівні держав та використовуючи їх природний та виробничий потенціали. Тому й імпакти цієї невеликої у відсотках кількості публікацій достатньо високі.

Відсотковий вміст внеску саме статей із галузі матеріалознавства у біоенергетику, як розділу, який для цього напрямку найбільше відповідає фундаментальній природничій науці, становить (включаючи Chemical Engineering (хімічну інженерію)) 35,9 % [2]. Тобто, біоенергетика відноситься до технологічних сфер, яка має вагому наукову складову.

Певну статистику щодо публікацій світової наукової спільноти за тегом «Biofuel Energy» наведено у таблиці 1. Однозначними країнами лідерами щодо публікацій у сфері біопаливної енергетики є США та Китай. Кожна із цих держав має потужні дослідницькі центри. Тому їх 1-а і 2-а позиції є очевидними. Індія, Великобританія, Німеччина та ін. – це країни, які обрали енергетичну безпеку як свій національний пріоритет.

Таблиця 1.

Статистика кількості публікацій по країнах та провідних науково-дослідних центрах відповідно до тегу «Biofuel Energy» («Біопаливна енергія / енергетика»)

| **Країни-лідери** | | **Провідні науково-дослідні центри** | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | **за кількістю публікацій** | | **за кількістю цитувань** | |
| 1. USA | США | 1. UC Berkeley | Каліфорнійський ун-т в Берклі | 1. Univ. of Utah, Salt Lake City, USA | Ун-т Юти, Солт-Лейк-Сіті, США |
| 2. China | Китай | | Центр с/г | | |
| 3. India | Індія | 2. USDA Agr. Res. Center | досліджень МСГ США | 2. Univ. College Cork, Cork, Ireland | Університетський коледж Корка, Корк, Ірландія |
| 4. UK | Велико-британія | | МСГ США | | |
| 5. Germany | Німеччина | 3. US Deprt. Agr. | Ун-т Сан-Паулу | 3. Univ. of Groningen, Groningen, Netherlands | Гронінгенський ун-т, Гронінген, Нідерланди |
| 6. Brazil | Бразилія | 4. Univ. Sao Paolo | Оук-Ридська нац. лабораторія | | |
| 7. Italy | Італія | 5. Oak Ridge Nat. Lab. | | | |
| 8. Canada | Канада | | | | |

Ситуація щодо науково-дослідних центрів, які займають провідні позиції за кількістю публікацій, дещо відмінна від рейтингу за державою. Існують центри, які є однозначними лідерами в енергетичних дослідженнях. Причому, це одночасно може бути і розробка політики щодо екологічних норм джерел енергії, і розробка принципово нових матеріалів та пристроїв. Тобто, існують організації, які здобули незаперечну позитивну репутацію (табл. 1, стовпчик 2): Каліфорнійський ун-т в Берклі, Центр сільськогосподарських досліджень Міністерства сільського господарства США, Університет Сан-Паулу, Оук-Ридська національна лабораторія та ін.

Але ще цікавішим є третій стовпчик табл. 1, у якому наведено центри, які є найбільш цитованими. Відбір проводився за найцитованішими дослідниками із цих центрів (наведено афіліацію найбільш визнаних вчених). У біоенергетиці перші три позиції займають заклади, що не входять у перелік організацій із стовпця 2. Тобто, загальна кількість публікацій авторів із

© Никируй Л.І., Замуруєва О.В., Федосов В.С., Урбан О.А., Захарчук Д.А., Федосов С.А.

закладів, що вказані у стовпці 3 є меншою, але саме вони є флагманами («засновником тенденцій»). І виявляється, що ці «засновники тенденцій» представляють організації не лише із США, Китаю, Індії, Німеччини, але й із Ірландії, Нідерландів, які не входять у перелік держав, наведених у стовпці 1 табл. 1. Тобто, якщо певна держава не входить до переліку тих країн, які видають найбільшу кількість публікацій, тим не менше, дослідники з них можуть претендувати на найвищі позиції у рангу світових вчених.

Найбільш цитовані публікації, пов'язані з біомасою та біопаливом, були опубліковані у таких журналах: Renewable and Sustainable Energy Reviews (h-індекс – 193), Biomass and Bioenergy (h-індекс – 143), Bioresource Technology (h-індекс – 229), Renewable Energy (h-індекс – 143), Energy (h-індекс – 146). Також за інформацією бази даних Scopus визначено найвидатніших та найвпливовіших вчених у галузі біоенергетики. Це Omer A.M. з Великобританії (має 122 публікації з біомаси як відновлюваного джерела енергії), Pari L. з Італії (103 публікації) та Kaltschmitt M. з Німеччини (102 публікації).

Кількість робіт українських та польських науковців набагато менша ніж кількість публікацій світового наукового співтовариства. Економічна ситуація в країнах суттєво впливає на кількість публікацій. Нижче наведено короткий опис інформації, наявної в міжнародних наукових базах даних про стан досліджень у напрямку біоенергетики проведений у двох прикордонних країнах. Ці дві країни зараз реалізують бажання розвиватися разом і є прикладом того, як можна створити конкурентне наукове середовище на кордоні ЄС. Для зручності проведення аналізу важливості наукових досліджень вченими з Польщі та України, зібрані дані узагальнені в таблиці 2.

Таблиця 2.

Порівняльна статистична характеристика досліджень України та Польщі, проведених у напрямку «Біоенергетика (енергія з біомаси та біопалива)»

| **Україна** | **Порівняння** | **Польща** |
|---|---|---|
| **71** | Кількість публікацій | **324** |
| **13** | h-індекс | **37** |
| – Nat. Univ. of Life and Environmental Sciences of Ukraine<br>– Nat. Univ. «Lviv Polytechnics»<br>– Taras Shevchenko Nat. Univ. of Kyiv<br>– Vasyl Stefanyk Precarpathian Nat. Univ. | Провідні установи (5 позицій) | – Polish Academy of Sciences<br>– Uniw. Jagielloński w Krakowie<br>– Uniw. Warminsko-Mazurski w Olsztynie<br>– Wrocław Univ. of Science and Technology<br>– Uniw. im. Adama Mickiewicza w Poznaniu |
| – Energy<br>– Agricultural and Biological Sciences<br>– Environmental Science<br>– Biochemistry, Genetics and Molecular Biology<br>– Engineering | Найбільше представленні наукові напрямки | – Biochemistry, Genetics and Molecular Biology<br>– Agricultural and Biological Sciences<br>– Environmental Science<br>– Energy |
| – European Commission<br>– Ministry of Education and Science of Ukraine | Найбільша фінансова підтримка | – Narodowe Centrum Nauki<br>– Ministry of Higher Education |
| – Germany<br>– Italy | Країна-партнер | – United States<br>– Germany |

Аналіз публікацій [6] показує, що дослідження біоенергетики є дуже актуальними з точки зору поліпшення навколишнього середовища, а саме вивчення біокомпозитів (або біополімерів) як заміни пластиків, виробництва біодизеля. Найцікавішими відновлюваними джерелами енергії для регіону Польщі є відходи біомаси сільськогосподарського виробництва, які також корисні для поліпшення навколишнього середовища та медичних цілей. Однак найцікавішим є виробництво біогазу [7, 8], що вимагає дешевої сільськогосподарської сировини. Огляд [7] є найважливішим з точки зору розробки технологічних процесів для біогазу (1) виробництва, (2)

© **Никируй Л.І., Замуруєва О.В., Федосов В.С., Урбан О.А., Захарчук Д.А., Федосов С.А.**

обробки, (3) утилізації та (4) промислової організації (симбіозу). А враховуючи високу потужність біогазових установок у Польщі, увагу приділяли дослідженню якості компосту для виробництва якісного біогазу [8].

Оскільки біомаса доступна в якості побічного продукту багатьох промислових і сільськогосподарських процесів майже скрізь, її легко отримати і вона є вуглецево-нейтральним джерелом енергії, відповідно до економічного аналізу біоенергетики в Європі біомаса є перспективним відновлювальним джерелом енергії з високим потенціалом росту.

Більшість робіт польських авторів присвячені загальним перспективам розвитку біомаси. Так, у [9] було проаналізовано найбільші установи, що виробляють біоетанол та біодизель. Проведено порівняльний аналіз різних поновлюваних джерел енергії для сільських територій. Вплив енергоефективності у виробництві біопалива на потенційне задоволення сільськогосподарської потреби в енергії досліджено в [10]. Математична модель показує результати виключення сільськогосподарських культур із виробництва продуктів харчування, спрямовані на задоволення енергетичних цілей. Представлений ряд продуктів, які можна отримати в сільськогосподарському виробництві та використовувати в енергетичних цілях. Проаналізовано потенційний обсяг сировини, яку можна отримати з сільського господарства Польщі для виробництва біогазу.

Дуже багато публікацій спрямовані на технічні характеристики виробництва біомаси. У [11] представлені результати дослідження технологій переробки біомаси верби та біомаси чорної сарани. Крім того, згідно з прогнозом на 2021 рік, приблизно 80 % кінцевої енергії з поновлюваних джерел надходитиме з біомаси, і майже вся її буде вироблятися за рахунок сільського господарства. Показано зміни в структурі використання біомаси. Таким чином, використання біомаси для опалення зменшується, а частка біомаси для електроенергії та біопалива збільшується. У той же час у публікаціях спостерігається тенденція щодо екологічності біоенергетики, зокрема, її внеску у зменшення парникового ефекту.

Ряд праць українських вчених також присвячені загальним тенденціям виробництва біоенергетики. Аналіз біологічних ресурсів для виробництва біопалив в Україні був зроблений у [12]. Аспекти переходу до агробіоенергетики в Україні, а також стратегії та рекомендації для різних зацікавлених сторін для полегшення цього переходу запропоновані в [13].

Позитивні тенденції біоенергетики підкреслюються в ряді досліджень. Орієнтовний енергетичний потенціал існуючих відходів біомаси становить близько 25 мільйонів тонн, а енергетичний потенціал біомаси, який можна вирощувати на невикористаних землях сільськогосподарського призначення, становить близько 13 мільйонів тонн. Проаналізовано ринки ріпаку України та Європейського Союзу, які є горизонтально інтегрованими. Автори [14] розраховували прибуток від біогазової установки для птахофабрики, а в [15] були наведені основні практичні кроки створення українського ринку біогазу.

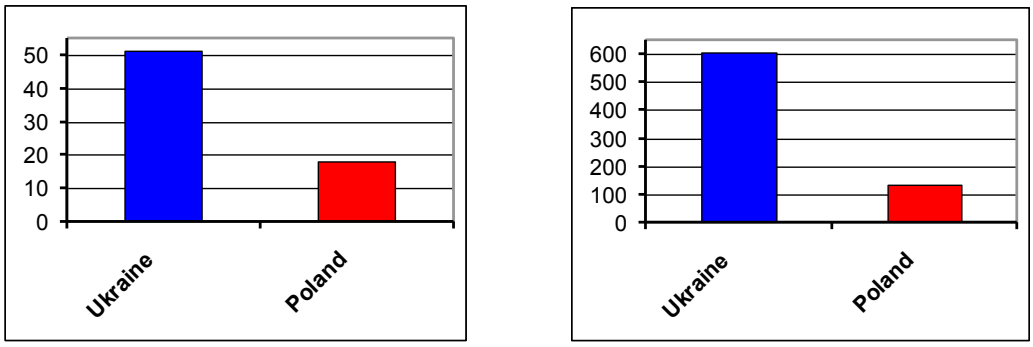
Спільна публікація [16] підсумовує дослідження біоаерозолів, які проводились у 1972–2009 рр. У таких галузях сільського господарства України та Польщі: тваринницьких господарствах, кормах, виробництві біопалива з ріпаку тощо. У ряді інших спільних публікацій оцінено потенціал біомаси, отриманої від побічних продуктів рослинництва та розведення тварин, які можуть бути використані в енергетичних цілях.

Загалом h-індекси публікацій українських дослідників є значно нижчими за h-індекси науковців світу [6, 17]. Для України практично без зміни у відсотковому співвідношенні від усієї кількості публікацій за тематикою відновлювальної енергетики залишилися кількість публікацій за тегом «Biofuel energy» (3 % в Україні проти 4 % у світі). Для кращого розуміння співвідношення між українськими, польськими досягненнями та існуючим станом публікацій у світі, побудовано діаграми, які демонструють відносні значення h-індексів та кількості публікацій (рис. 1). Нижчі значення демонструють вищий потенціал досягнень дослідників (зворотний характер).

Розглядаючи енергію біопалива (енергія з біомаси та біопалива) в Україні та Польщі, можна виділити певні спільні риси. Перш за все, співпраця польських та українських вчених, виражена через велику кількість спільних публікацій, що є пріоритетом обох країн. Також вчені обох країн успішно співпрацюють зі своїми колегами з Німеччини (табл. 2). Тобто є спільні дослідження як сусідніх держав, так і високотехнологічних, які володіють найсучаснішим обладнанням. Хоча практичний розвиток біоенергетики визначається виключно економічною ситуацією в аграрному секторі.

© Никируй Л.І., Замуруєва О.В., Федосов В.С., Урбан О.А., Захарчук Д.А., Федосов С.А.

Існує різниця в кількості (324 та 71 відповідно для Польщі та України) та «імпакт-фактору» (37 та 13 відповідно) публікацій у напрямку біоенергетики. Для більш ефективного аналізу визначаються їх нормалізовані залежності: $h_{norm} = h_i / N_i$, де $h_i$ – h-індекс публікацій у відповідному напрямку, $N_i$ – загальна кількість публікацій у цьому напрямку.




а б

Рис. 1. Співвідношення (а) h-індексів ($h_{glob}/h_{ukr}$, $h_{glob}/h_{pol}$) та (б) кількості публікацій ($N_{glob}/N_{ukr}$, $N_{glob}/N_{pol}$) за напрямком «Біопаливна енергетика» (Biofuel energy) науковців України та Польщі до світових

Для «Біоенергетики» h-індекс польських вчених значно вищий. Це свідчить про стимулювання подібних досліджень на державному рівні в Польщі та надто малу підтримку з боку України на цьому етапі. Однак, враховуючи, що публікації українських вчених почали публікуватися в цій галузі за останні кілька років, і завдяки партнерству між науковими установами обох країн можна передбачити збільшення як кількості, так і якості таких матеріалів у межах наступні 5 років.

**Висновки.** Для ефективного розвитку та впровадження біопаливної енергетики необхідно враховувати одночасно різні фактори: економічний та наявність інвестицій, розробки нових, екологічно чистих та ефективних досліджень і створення можливостей для їх впровадження.

Якість досліджень можна довести на основі передових наукових публікацій у рецензованих журналах. Кількість та вплив таких наукових публікацій свідчать про потенціал наукових колективів, їх актуальність та можливість впровадження.

Різниця майже в 2 рази нормалізованого h-індексу (відповідно 9 і 5) за напрямом «Біоенергетика» свідчить про значно більший прогрес польських вчених у цьому напрямку. Прикладні дослідження, які потребують складних установок для їх тестування або дорогого імітаційного програмного забезпечення, ефективніше впроваджуються в країнах ЄС.

**Інформаційні джерела**

1. Yakubiv V., Zhuk O., Prodanova I. Model of region's balanced agricultural development using the biomass energy potential. Economic Annals-XXI. 2014. № 3-4(1). P. 86–89.

2. Wisz G., Nykyruy L., Yakubiv V., Hryhoruk I., Yavorskyi R. Impact of Advanced Research on Development of Renewable Energy Policy: Case of Ukraine. Int. J. Renewable Energy Res. 2018. Vol. 8, № 4. P. 2367–2384.

3. Ehrlich R., Geller H.A. Renewable Energy, 2nd Ed.: A First Course. CRC Press, 2017. 490 p.

4. Energy DG, European Commission. EU, Energy in Figures, Statistical Pocketbook 2017. Brussels: Publications Office of the European Union, 2017. 265 p.

5. Nykyruy L.I., Zamurujeva O.V., Urban O.A., Fedosov S.A. The Impact of Scientific Research on the Development of Renewable Energy. Perspective Technologies and Devices. 2020. № 16. P. 82–91.

6. Nykyruy L., Yakubiv V., Wisz G., Hryhoruk I., Zapukhlyak Z., Yavorskyi R. Renewable Energy in Ukraine - Poland Region: Comparison, Critical Analysis and Opportunities. In Renewable Energy-Resources, Challenges and Applications. IntechOpen. 2020.

© **Никируй Л.І., Замуруєва О.В., Федосов В.С., Урбан О.А., Захарчук Д.А., Федосов С.А.**

7. Budzianowski WM. A review of potential innovations for production, conditioning and utilization of biogas with multiple-criteria assessment. Renewable and Sustainable Energy Rev. 2016. Vol. 54. P. 1148–1171.

8. Godlewska P., Schmidt H.P., Ok Y.S., Oleszczuk P. Biochar for composting improvement and contaminants reduction. A review. Bioresour. Technol. 2017. Vol. 246. P. 193–202.

9. Igliński B., Iglińska A., Kujawski W., Buczkowski R., Cichosz M. Bioenergy in Poland. Renewable and Sustainable Energy Rev. 2011. Vol. 15, № 6. P. 2999–3007.

10. Wasiak A.L. Effect of Biofuel Production on Sustainability of Agriculture. Procedia Eng. 2017. Vol. 182. P. 739–746.

11. Wrobel M., Mudryk K., Jewiarz M., Knapczyk A. Impact of raw material properties and agglomeration pressure on selected parmeters of granulates obtained from willow and black locust biomass. 17th Int. Sci. Conf. Engineering for Rural Development, 23.–25.05.2018, Jelgava. 2018. P. 1933–1838.

12. Panchuk M., Kryshtopa S., Shlapak L., et al. Main trends of biofuels production in Ukraine. Transport Problems. 2017. Vol. 12, № 4. P. 15–26.

13. Voytenko Y. Pathways for agro-bioenergy transition in Ukraine. Biofuels, Bioproducts and Biorefining. 2012. Vol. 6, № 2. P. 124–134.

14. Yevdokimov Y., Chygryn O., Pimonenko T., Lyulyov O. Biogas as an alternative energy resource for Ukrainian companies: EU experience. Innovative Marketing. 2018. Vol. 14, № 2. P. 7–15.

15. Cebula J., Chygryn O., Chayen S.V., Pimonenko T. Biogas as an alternative energy source in Ukraine and Israel: Current issues and benefits. Int. J. Environ. Technol. Management. 2018. Vol. 21, № 5/6. P. 421–438.

16. Tsapko V.G., Chudnovets A.J., Sterenbogen M.J., et al. Exposure to bioaerosols in the selected agricultural facilities of the Ukraine and Poland - a review. Ann. Agric. Environ. Med. 2011. Vol. 18, № 1. P. 19–27.

17. Nykyruy L., Zamurujeva O., Fedosov V., Biruk O., Fedosov S. Scientific and Technical Progress of Renewable Energy Development in Ukraine. Scientific Notes. 2020. № 70. P. 18–26.

**Никируй Л.И.[1], Замуруева О.В.[2], Федосов В.С.[2], Урбан О.А.[3], Захарчук Д.А.[3], Федосов С.А.[2]**
[1]Прикарпатский национальный университет имени Василия Стефаника
[2]Волынский национальный университет имени Леси Украинки
[3]Луцкий национальный технический университет

**ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ БИОТОПЛИВНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

*В работе проанализированы публикации авторитетных мировых ученых и из двух соседних стран – Украины и Польши в области биотопливной энергетики, чтобы найти закономерности развития этого направления в мире и каждом из государств в частности, а также определить перспективы для совместных исследований. Анализ основывается на результатах данных, опубликованных в международных научных базах данных Web of Science и Scopus. Выявлено состояние развития отрасли в мире, Украине и Польше, проанализированы как теоретические, так и прикладные исследования, направленные на практическое применение.*

***Ключевые слова:*** *возобновляемые источники энергии, энергия биотоплива, биотопливо, биомасса, Украина, Польша, h-индекс.*

**Nykyruy L.I.[1], Zamurujeva O.V.[2], Fedosov V.S.[2], Urban O.A.[3], Zakharchuk D.A.[3], Fedosov S.A.[2]**
[1]Vasyl Stefanyk Precarpathian National University
[2]Lesya Ukrainka Volyn National University
[3]Lutsk National Technical University

**PROMISING BIOFUEL ENERGY TECHNOLOGIES**

*The paper analyzes the publications of authoritative world scientists and from two neighboring countries – Ukraine and Poland in the fields of biofuel energy in order to find patterns in the development of this direction in the world and in each of the states in particular, as well as to determine the prospects for joint research. The analysis is based on the results of data published in the international scientific databases Web of Science and Scopus. The state of development of the industry in the world, in Ukraine and Poland is revealed, both theoretical and applied research aimed at practical application are analyzed.*

***Keywords:*** *renewable energy, biofuel energy, biofuels, biomass, h-index, Poland, Ukraine.*

**© Никируй Л.І., Замуруєва О.В., Федосов В.С., Урбан О.А., Захарчук Д.А., Федосов С.А.**

UDK 531.
**A. Perederko, PhD**
State University of Intelligent Technologies and Communications, Odessa, Ukraine.

## THE USE OF A WAVELET TRANSFORMATION FOR REMOVAL OF THE NOISE COMPONENT FROM THE VIBRO SIGNAL

*The article investigates the use of wavelets to remove noise from the measuring vibration signal. It is determined that wavelets are well adapted for signal analysis, for which the principle of causality is important: wavelets preserve the direction of time and do not create parasitic interference between the past and the future. Criteria for selecting an analytical wavelet have been developed, depending on what information should be extracted from the signal and the need to more fully identify and emphasize certain properties of the analyzed signal. It is proposed to use Daubechies wavelets to process the vibration signal data. The simulation of vibration signal filtering from noise with the normal distribution law is performed in the MATCAD package. It is proved that the method of wavelet transform allows to solve the problem of filtering the vibration signal from noise when processing vibration signals obtained by autonomous recording devices in conditions of increased interference from the environment. The obtained results evidence to the prospects of the developed method and its advantages in comparison with the hardware solution of the filtering problem.*

***Keywords:*** *vibration signals, noise component of a signal, wavelet transform, threshold methods of signal processing.*

**Introduction**. Modern means of control and diagnostics of units of machines and equipment are mostly based on the principles of measurement and analysis of vibration signals. This is due to the fact that vibration control in mechanical systems gives the largest amount of diagnostic information compared to methods such as temperature control, lubricant analysis and others. It follows that the vibration signal can detect almost all types of defects in the components of machines and equipment without the involvement of other types of physical processes for diagnosis. It is known that measurements during vibration diagnostics of equipment are carried out at the place of its operation. This leads to the impact on the measured signal of various industrial disturbances, which create in the measurement channel noise of complex amplitude-time implementation in a wide range of frequencies. These noises distort the vibration signal information and cause significant measurement errors.

That is due to the accuracy and reliability of the signal. The signal is of great importance.

**Main part.** Recently, there has been interest in other integral transformations, in particular, the wavelet transform (or discrete wave transform). It is used mainly for the analysis of nonstationary signals and for many problems of this kind it is more effective than the Fourier transform. The main difference of the wavelet transform is the decomposition of data not by a sine wave (as for the Fourier transform), but by other functions, that are called wavelet generators. Wavelet-forming functions, in contrast to an infinitely oscillating sine wave, are localized in some limited region of their argument, and far from it are zero or negligible.

The computational technique of wavelet transform allows to solve the problem of filtering (noise reduction) in relation to the spatio-temporal data obtained during vibration monitoring (when using threshold functions of different shapes, the level of detailing coefficients is limited) [1]. By setting a certain threshold for their level and "cutting off" the coefficients below this threshold, you can get a significant reduction in noise. It is proposed to use Daubechies mother wavelets to process the vibration signal data.

Since the wavelet transform is a scalar multiplication of the analyzing wavelet at a given scale and the analyzed signal, the coefficients of the scale-time spectrum $W(a, b)$ contain combined information about the analyzing wavelet and the analyzed signal (as well as Fourier transform coefficients containing information about the signal and about a sinusoidal wave). The choice of analyzing wavelet is usually determined by what information needs to be extracted from the signal. Each wavelet has characteristic features in time and frequency space, so sometimes with the help of different wavelets you can more fully identify and emphasize certain properties of the analyzed signal.

Wavelets are well adapted for signal analysis, for which the principle of causality is important: wavelets preserve the direction of time and do not create parasitic interference between the past and the future.

© **Anatolij Perederko, PhD**

It should be noted that when analyzing a complex one-dimensional signal or when using a complex analyzing wavelet as a result of wavelet transform, two-dimensional arrays of values of the modulus of coefficients and phase are obtained.

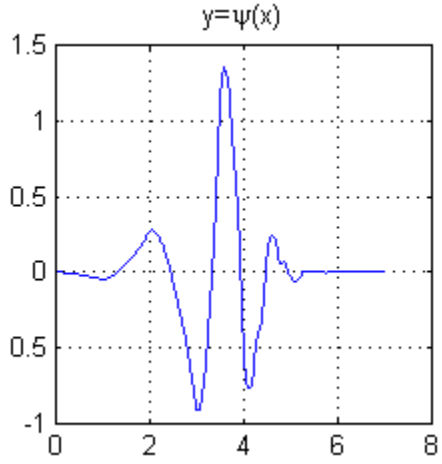



Fig.1. Mother Daubechies wavelet D4.

That is, the wavelet scale-time spectrum *W(a,b)* in contrast to the Fourier spectrum is a function of two arguments: the time scale of the wavelet - *a* (in units of inverse frequency), and the time offset of the wavelet on the signal-*b* (in units of time), while the parameters *a* and *b* can take any value within the scope of their definition. The appearance of Daubechies orthogonal wavelet filters or so-called compact carrier filters has greatly increased interest in wavelet analysis, as new opportunities have opened up not only for the theoretical but also for the practical application of wavelet transforms.

It is important to note that Daubechies wavelet filters are built based on the criterion of filter length and, therefore, are filters with a finite number of coefficients [1]. It is customary to denote the wavelet functions *ψ(x)* of Daubechies filters by the letter D with the addition of a number corresponding to the length of the Daubechies wavelet filter, ie D2, D4, D6, etc.

The theoretical basis of the computational technique for purification of the vibration signal from noise is the use of threshold functions of different shapes, based on which the level of detailing coefficients is limited [2,8,9].

For the first time the idea of eliminating electrical noise from signals using wavelet transform originates in the work of Donohue and Johnstone [3,4], which proposes the use of a certain threshold to eliminate Gaussian white noise in electrical signals.

Thus, by setting a threshold of a certain level and "cutting off" the coefficients below this threshold, you can significantly reduce the noise level and compress the signal. A known example of threshold functions is presented in Fig.1. Figure 1 (a) shows a hard threshold function - *hard* (hard threshold evaluation), which is described by the following expression:

$$y(x)=\begin{cases} x, & \text{if } |x|\geq T \\ 0, & \text{if } |x|<T. \end{cases} \qquad 1)$$

Here, the value of *T* is a certain threshold value, the possibility of determining which will be discussed below, as *x* and *y* are the input and output values of the conversion coefficients. Figure 2 (b) presents a soft threshold function (soft threshold evaluation), which is described by the following expression:

$$y(x)=\begin{cases} \text{sign}(x)\cdot(|x|-T) & \text{if } |x|\geq T \\ 0, & \text{if } |x|<T. \end{cases} \qquad (2)$$

The notation given in expression (2) is the same as described above in (1). The option sign (*x*), that determines the sign of the coefficient *x*, is a function of the form:

$$\operatorname{ign}(x) = \begin{cases} 1, & \text{if} \quad x > 0, \\ 0, & \text{if} \quad x = 0, \\ -1, & \text{if} \quad x < 0. \end{cases} \qquad 3)$$

It is known that the main difference between the soft threshold function and the hard one is that the first of them does not contain a gap at a point determined by the limit value *T* [1,5]. In other words, the soft threshold function, unlike the hard one, is continuous. The latter circumstance, in the case of soft threshold processing, allows the best way to process a noisy vibration signal in the vicinity of the point of its rupture.

The question arises: which threshold function is better for noise filtering. Additionally, a computational experiment allows us to note the following features of the threshold functions *hard* and *soft*:

- the *hard* function acceptably works at a low noise level, when all the noise coefficients of decomposition by modulo less than the threshold *T* and they are respectively zeroed, and all informative coefficients exceed the modulus threshold *T* and therefore they are stored;

- the absence of a *soft* gap in the vicinity of point *a* (see Fig. 2) to some extent prevents the appearance of oscillations (Gibbs effect) at special points of the signal. This effect can occur when using the *hard* threshold function.

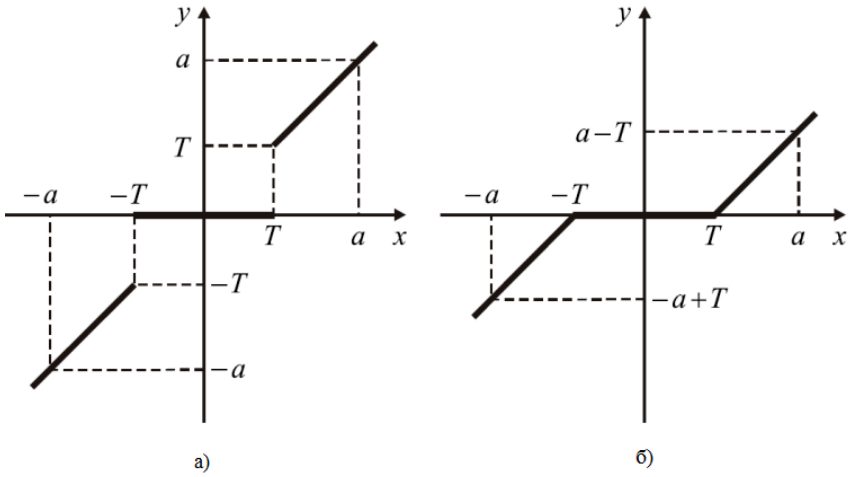



Fig.2. Marginal processing functions of transformation coefficients:
а) *hard* - hard threshold function; б) *soft* - soft threshold function.

Reducing the value of the decomposition coefficients by the threshold value, in the case of soft threshold processing, in General for a large number of signals has a negative impact on the final assessment of the quality of the recovered signal. Experiments show that a rigid threshold estimate is more preferable in terms of numerical evaluation of the quality of the recovered signal. According to research in [4,6,7], in order for the numerical evaluation of the recovered signal to approach the latter in the case of hard threshold processing in the case of soft threshold processing, it is necessary to choose a threshold value *T* equal to half the value of the hard signal processing threshold. It is known that the main problem of using threshold processing methods is the choice of threshold value. Typically, the choice of threshold was made using the following expression:

$$T = \sigma\sqrt{2\ln(N)}. \qquad 4)$$

Formula (4) is written for the case of a one-dimensional signal (in our case, a vibration signal from a uniaxial accelerometer). The formula uses the following notation: *N* is the total number of samples of the processed signal, σ is the standard deviation of the noise:

$$\sigma = \frac{M_x}{0,6745}, \qquad (5)$$

© **Anatolij Perederko, PhD**

where $M_x$ is the median of the absolute value of the set of coefficients $\{X\}$. Since wavelets are widely used to solve the problem of noise reduction, it is advisable to use them to process the vibration signal when monitoring the technical condition of the equipment. The results of solving the problem of signal noise filtering when measuring vibration are shown in Fig.4 (based on Daubechies wavelets). The results were obtained by modeling the filtering of the vibration signal with a noise component (Gaussian noise) in the MATCAD package.

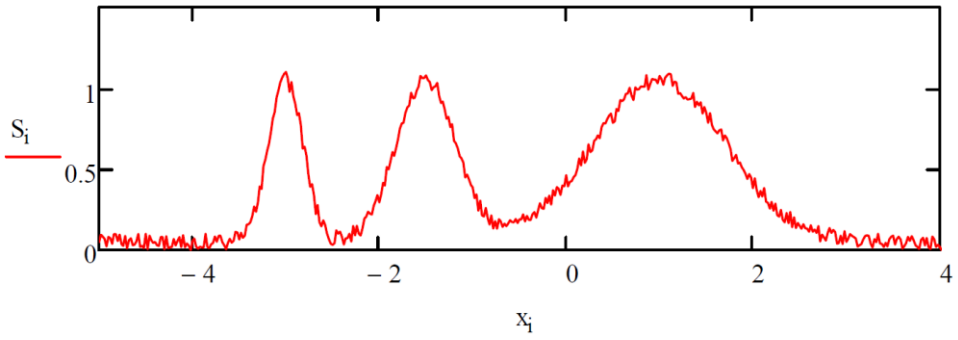



Fig.3. Image of the vibration signal model with noise.

Fig. 3 shows the vibration signal with a noise component. When performing in the MATCAD [6,7,10] environment of the above simulation, to simulate the vibration signal, a signal of complex frequency implementation was used. To simulate the noise component, a pseudo-random signal with a normal distribution law is superimposed on the specified signal.

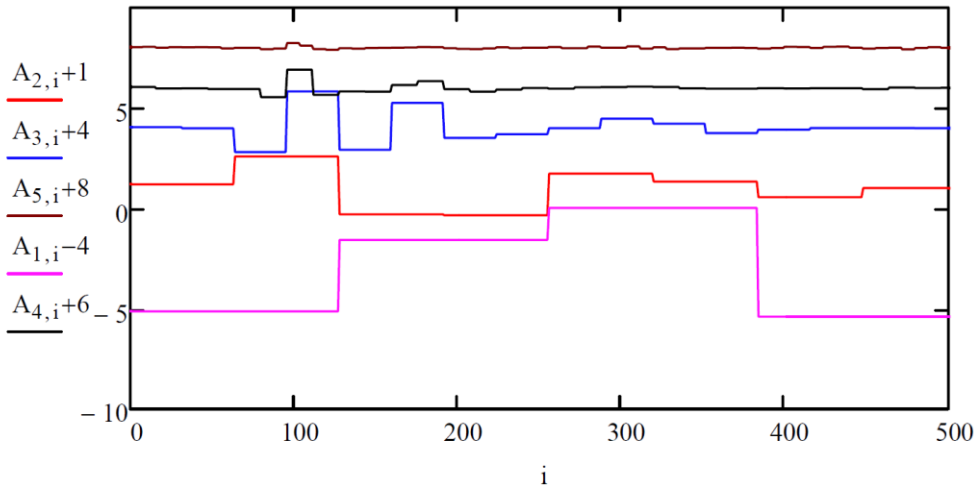



Fig.4. The wavelet spectrum of the Daubechies model signal. The results of calculations of the Daubechies wavelet spectrum are presented in the form of five families of its coefficients.

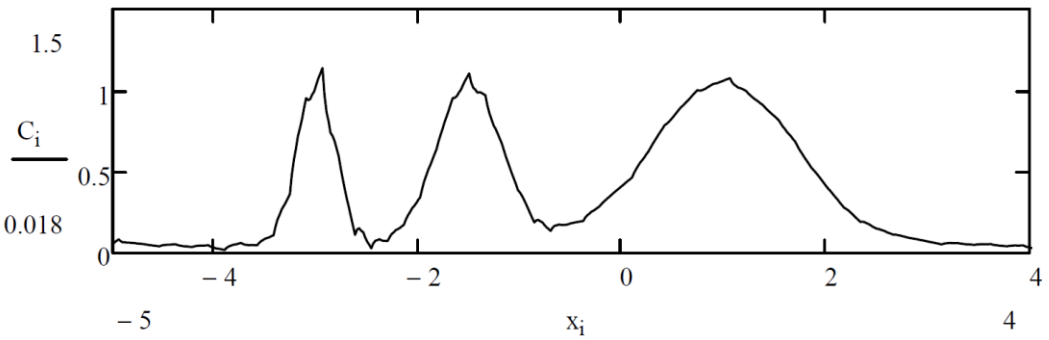



Fig.5. Image of the processed input signal without noise, that was eliminated as the result of the inverse wavelet transform.

© **Anatolij Perederko, PhD**

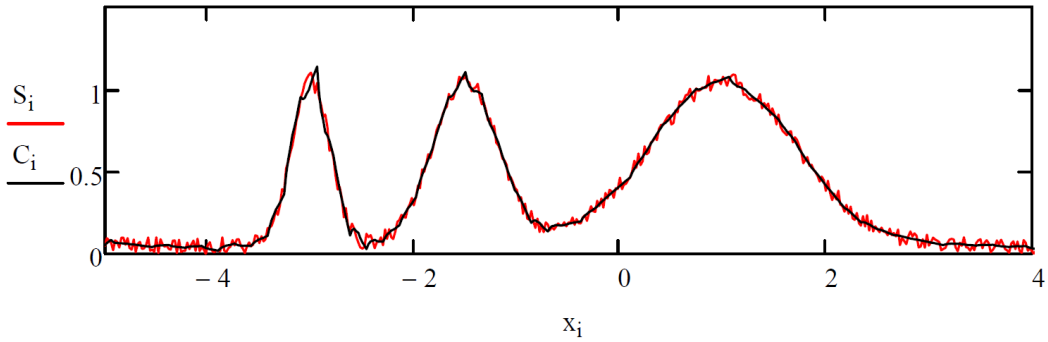



Fig.6. Image of the input signal with noise (Si) and the purified signal (Ci), without the noise, that was eliminated as the result of the inverse wavelet transform.

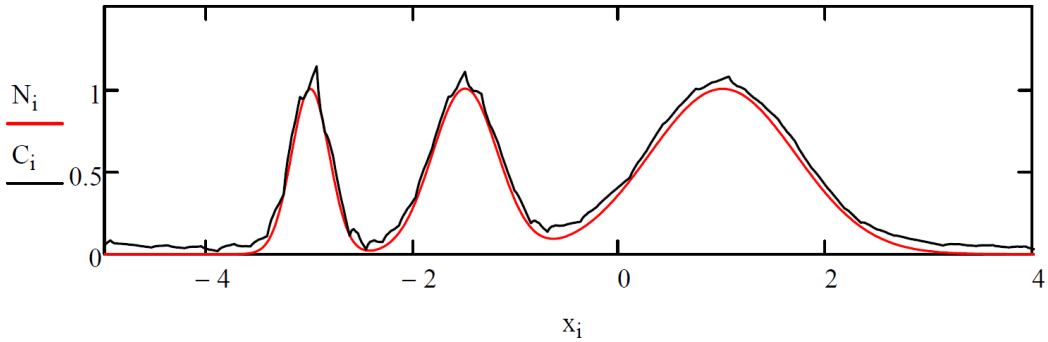



Fig.7. Image of the input signal without noise (Ni) and the cleared signal (Ci).

Fig. 7 shows a comparison of the playback accuracy relative to the initial signal of the simulation of the vibration signal Ni (signal Si without noise component) and the signal recovered after filtering from noise.

As can be seen from the figure, in general, the restored signal, with small differences, fully reproduces the useful signal in both amplitude and frequency implementations.

**Conclusion.** In this paper, the simulation of vibration signal filtering from noise with the normal distribution law in the MATCAD package is performed. The obtained results show that the wavelet transform method allows to solve the problem of filtering the vibration signal from noise. The obtained results evidence to the prospects of the developed method and its advantages in comparison with the hardware solution of the filtering problem. It can be concluded that in many cases this method can be used in the processing of vibration signals obtained by autonomous recording devices in conditions of increased interference from the environment.

**References**

1. Daubechi I. Desyat` lekczij po vejvletam. — Izhevsk: NICz «Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika», 2001, - 464 s.

2.Voskobojnikov Yu. E. Postroenie algoritmov vejvlet-fil`traczii s dvukhparametricheskimi porogovy`mi funkcziyami / Yu. E. Voskobojnikov, A. V. Gochakov // Avtometriya. –2012. – T. 48, # 1. – S. 17–29.

3. Ajficher E`. Czifrovaya obrabotka signalov: prakticheskij podkhod. 2-e izd. / E`.Ajficher, B. Dzhervis //M.: Vil`yams, 2004.

4. Mitrakhovich M. M. Ispol`zovanie vejvlet-preobrazovaniya v zadachakh diagnostirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya gazoturbinny`kh dvigatelej / M. M. Mitrakhovich // Tekhnologicheskie sistemy`. – 2014. – # 3 (68). – S. 22-26.

5. Kavchuk S.V. Sbornik primerov i zadach po teorii signalov: Rukovodstvo dlya prakticheskikh zanyatij na baze Mathcad 6.0 Plus/ S.V. Kavchuk// Taganrog,Izd-vo TRTU, 2001.

6. Makarov E. Inzhenerny`e raschety` v Mathcad-15/ E.Makarov // SPb.: Piter, 2011.

7. Daubechies I. The Wavelet Transform, Time-Frequency Localization and Signal Analysis // IEEE Trans. Inform. Theory, 1990, № 5. p. 961-1005.

8. Sergienko A.B. Czifrovaya obrabotka signalov. – SPb.: Piter, 2003. – 604 s.

© **Anatolij Perederko, PhD**

9. Astafeva N.M. Vejvlet-analiz: osnovy` teorii i nekotory`e prilozheniya // Uspekhi fizicheskikh nauk, 1996, # 11. S. 1145-1170.

10. Goswami J.C., Chan A.K. Fundamentals of Wavelets. Theory, Algorithms, and Applications. Wiley, 2000. – 306 p.

**А. Передерко**

**ВИКОРИСТАННЯ ВЕЙВЛЕТ ПЕРЕТВОРЕННЯ ДЛЯ ВИДАЛЕННЯ ШУМОВОЇ СКЛАДОВОЇ З ВІБРОСИГНАЛУ**

*Стаття досліджує використання вейвлетів для усунення шуму від вимірювального вібраційного сигналу. Визначено, що вейвлети добре пристосовані для аналізу сигналів, для чого важливий принцип причинності: вейвлети зберігають напрямок часу і не створюють паразитарних втручань між минулим і майбутнім. Розроблено критерії вибору аналітичного вейвлету в залежності від того, яку інформацію слід витягнути із сигналу, та необхідності більш повно визначити та підкреслити певні властивості аналізованого сигналу. Для обробки даних сигналу вібрації пропонується використовувати вейвлети Daubechies. Імітація фільтрації вібраційних сигналів від шуму за нормальним законом розподілу виконується в пакеті MATCAD. Доведено, що метод вейвлет-перетворення дозволяє вирішити проблему фільтрації вібраційного сигналу від шуму при обробці вібраційних сигналів, отриманих автономними реєструючими пристроями, в умовах підвищених перешкод від навколишнього середовища. Отримані результати свідчать про перспективи розробленого методу та його переваги в порівнянні з апаратним вирішенням проблеми фільтрації.*

***Ключові слова**: вібраційні сигнали, шумова складова сигналу, вейвлет-перетворення, порогові методи обробки сигналів.*

**А. Передерко**

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕЙВЛЕТ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ УДАЛЕНИЯ ШУМОВОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ С ВИБРОСИГНАЛА**

**© Anatolij Perederko, PhD**

**УДК 621 7.043**

**Пилипець М.І., д.т.н., Васильків В.В., д.т.н., Радик Д.Л., к.т.н., Пилипець О.М., к.т.н.**
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

# ПЕРЕДУМОВИ РОЗРОБЛЕННЯ КОМБІНОВАНИХ ОПЕРАЦІЙ ВИГОТОВЛЕННЯ ГВИНТОВИХ І ШНЕКОВИХ ЗАГОТОВОК МЕТОДОМ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ ТИСКОМ

*У рамках системного підходу дано постановку задачі вдосконалення технологічних процесів отримання гвинтових і шнекових заготовок у виробництві гвинтових виробів на основі розробки і ефективного використання комбінованих операцій методу обробки металів тиском. Назва такої операції об'єднує назву кількох простих операцій, розміщених в порядку превалювання питомої ваги одного процесу над іншим. Наведено термінологічний опис відомих основних простих (осадження, висаджування, протягування ковальське, радіальне обтискування, гнуття, скручування, навивання, та інші) та окремих комбінованих процесів формоутворення гвинтових і шнекових заготовок методом обробки тиском. Структуризацію та розроблення термінологічного опису операцій здійснено згідно класифікатору 185151 технологічних операцій машино- і приладобудування на основі використання стандартів DIN 8580-DIN 8586, ДСТУ 2263-93. На основі використання показників технологічності дано характеристику та наведено межі використання відомих процесів. Рекомендовано матеріали, які використовуються для виготовлення гвинтових і шнекових заготовок. Отримані результати можуть бути використані для синтезу нових комбінованих процесів отримання гвинтових виробів. Їх впровадження дозволяє істотно збільшити продуктивність виробництва, зниження енерговитрат і матеріаломісткості, скорочення виробничих площ, створення можливості автоматизації і ефективного управління, підвищення якості продукції, поліпшити екологічну обстановку тощо.*

**Ключові слова:** *комбінована операція, гвинтова заготовка, шнекова заготовка, вальцьована гвинтова заготовка, секційна гвинтова заготовка, кільцева секторна заготовка, скручена гвинтова заготовка, розгортка витка гвинтової заготовки, зварна гвинтова заготовка, гофрована гвинтова заготовка.*

**Постановка проблеми.** Технологічна операція виготовлення гвинтових (ГЗ) і шнекових (ШЗ) заготовок є однією із основних у виробництві гвинтових виробів - робочих органів екструдерів, шнекових транспортерів, грануляторів, змішувачів, циклонів, гвинтових паль та анкерів, гвинтових пресів, турбін, витих магнітопроводів тощо. Їх номенклатура та типорозміри постійно розширюється. При цьому у сучасному виробництві таких виробів існує необхідність розробки нових технологій, що базуються на розробленні і застосуванні комбінованих операцій, побудованих на поєднанні двох і більше базових (простих) процесів. Як відомо, базовим процесом називають такий, при якому під час прикладання навантаження зовнішній розподіл сили і її напрямок в зоні пластичної деформації (кристалізації) не змінюється. У комбінованих процесах відбувається інтегральне накладення навантажень в одному осередку деформації, іноді зі зміною напрямку течії металу, або розділенням базових процесів в часі або просторі. Назва такої операції об'єднує назву кількох простих операцій, розміщених в порядку превалювання питомої ваги одного процесу над іншим. Реалізація таких комбінованих операцій отримання ГЗ і ШЗ у виробництві гвинтових виробів забезпечує підвищення продуктивності праці, зниження енерговитрат і матеріаломісткості, скорочення виробничих площ, створення можливості автоматизації і ефективного управління, підвищення якості продукції, покращення екологічної обстановки тощо.

**Аналіз відомих результатів досліджень.** Аналіз окремих результатів практичної реалізації комбінованих процесів показав, що їх успішно застосовують і вони є перспективними [1, 2]. Базові операції та результати їх досліджень наведено в [1-16]. Незважаючи на певні успіхи в розвитку теорії і практики комбінованих процесів, теоретичні та практичні основи цих процесів розроблені недостатньо. Багатоманітність існуючих базових процесів обробки металів тиском вимагає їх термінологічного опису та класифікації, опису характеристик і визначення меж їх використання, оскільки вони є основою для синтезу ефективних комбінованих процесів, їх моделювання, розрахунку та оптимізації.

**Мета роботи.** Здійснити термінологічний опис основних простих процесів

**© Пилипець М.І., д.т.н., Васильків В.В., д.т.н., Радик Д.Л., к.т.н., Пилипець О.М., к.т.н.**

формоутворення ГЗ і ШЗ методом обробки металів тиском на базі методології системного аналізу. На основі використання показників технологічності дати характеристику і визначити межі використання згаданих процесів. Описати відомі базові та комбіновані процеси формоутворення таких деталей.

**Постановка задачі.** У рамках системного підходу існує необхідність у вдосконаленні технологічних процесів отримання гвинтових виробів на основі впровадження комбінованих процесів формоутворення ГЗ і ШЗ.

Структуризацію, кодування та розроблення термінологічного опису операцій здійснюємо згідно класифікатору 185151 технологічних операцій машино- і приладобудування на основі використання стандартів DIN 8580-DIN 8586, ДСТУ 2263-93. Кожна з операцій може бути реалізована різними технологічними способами залежно від схеми формоутворення, геометричною формою та закономірностями зміни контакту інструменту та заготовки з часом, температурою деформації тощо.

Виготовлення ГЗ і ШЗ методом обробки тиском здійснюють на таких операціях.

Осадження (2121). Операцію виконують двома групами способів: а) утворення ГЗ із відкритою навивкою витків шляхом зміни ширини початкової заготовки при збільшенні площі її поперечного перетину внаслідок направленого переміщення матеріалу за шириною заготовки. Сили дієють на початкову заготовку в напрямку, перпендикулярному до її ширини, за допомогою інструменту, який не обмежує формування найбільшого поперечного розміру утвореної ГЗ; б) оброблення (зміна геометричних розмірів) багатовиткових ГЗ із закритою навивкою або секційних гвинтових заготовок (СГЗ) шляхом зменшення довжини такої спіралі при збільшенні висоти її витків.

Висаджування (2122) – операція утворення цільної ШЗ шляхом зменшення висоти циліндричної заготовки у відкритому штампі із гвинтовою щілиною роз'єму з одночасним збільшенням площі поперечного перетину її частини за рахунок заповнення деформованим матеріалом такої щілини та утворенням витка, який прилягає до циліндричного сердечника утвореної кованки.

Розганяння (2124). Можна виділити два види таких операцій: а) утворення нециліндричної ГЗ із циліндричної ГЗ внаслідок дії інструменту в напрямку, перпендикулярному до поздовжньої осі такої заготовки; б) утворення ГЗ внаслідок збільшення ширини початкової заготовки (розміру в плані) за рахунок асиметричного обтиснення її поперечного перетину (переважно з наданням її перетину клиноподібної форми).

Радіальне обтискування (2125) – зменшення площі поперечного перетину заготовки внаслідок її асиметричного обтискання співвісними інструментами (бойками) які здійснюють радіальні зворотно-поступальні рухи при одночасному відносному поступальному переміщенні заготовки відносно інструментів.

Передавання (2126) – це операція під час якої здійснюють зміщення (зсування) гвинтовою лінією однієї частини кільцевої секторної заготовки (КСЗ) або листової заготовки відносно іншої її частини при збереженні паралельності осей, площин чи поверхонь частин заготовки.

Гнуття (2129) – інкрементальна операція надання прямолінійній смуговій або кільцевій секторній заготовці просторової спіральної форми за рахунок місцевого пластичного деформування шляхом утворення або зміни кутів між частинами оброблюваної заготовки за декілька переходів за рахунок покрокового одно-, двох- або багатокутового гнуття частин заготовки без попередньої фіксації кінців, без взаємодії за внутрішньою крайкою з опорним елементом у вигляді оправи з використанням штампів або профілезгинальних агрегатів. Операція забезпечує зміну напрямку головної осі початкової заготовки внаслідок впливу, інструменту який здійснює поступальне або колове переміщення в напрямку, перпендикулярному до такої головної осі.

Скручування (2131) – операція отримання скручених ГЗ із прямолінійних стрічкових заготовок та скручених СГЗ із КСЗ шляхом провертання частини заготовки відносно іншої її частини під певним кутом навколо спільної осі, яка перпендикулярна до профілю нормального поперечного перетину заготовки. Процес супроводжується зміною (для СГЗ) або без зміни (для скручених ГЗ) напрямку головної осі початкової заготовки.

Навивання (2134) – операція характеризується локальною зоною деформації, що переміщається і зумовлює згин в площині, перпендикулярній до руху вихідної заготовки, забезпечуючи зміну основної осі початкової заготовки (прутка, стрічки) з наданням їй гелікоїдної форми внаслідок послідовного вигинання заготовки навколо оправки або шаблону

(вигинної вставки), які здійснюють відносний обертовий рух.

Згідно класифікатора 185.151 операція навивання – це утворення спіральної заготовки послідовним згинанням. На нашу думку відмінність її від гнуття є неперервність переміщення зони деформації при утворенні НЗ.

Роздавання (2139) – операція утворення порожнистих ШЗ шляхом збільшення розмірів поперечного перетину порожнистої заготовки з одночасним утворенням профільованої поверхні у вигляді гвинтових виступів і впадин внаслідок одночасної дії інструменту по всьому периметру.

Формування (2142) – штампувальна операція отримання СГЗ між двома інструментами, при якій змінюється форма вихідної плоскої КСЗ з утворенням необхідного кроку за рахунок місцевого розтягу без зміни товщини матеріалу. Відомі комбіновані операції "Формування-осадження" та "Формування-вальцювання".

Видавлювання (2145) – технологічна операція отримання цільних або порожнистих ШЗ (труб з гвинтовими ребрами та гвинтовими канавками) з одно або багато західними витками та ГЗ (переважно скрученими), яка характеризується локальним джерелом(ами) деформації, направленим гвинтовим витікання матеріалу при його видавлюванні (витісненні) із загального "приймача" (контейнера) в канал, сукупність каналів (пазів) або щілин з гвинтовими поверхнями між цільними або роз'ємними частинами інструмента (матриці). Профіль, кількість і кут підняття спіралі гвинтових поверхонь матриці виконують відповідними конфігурації заготовок, які отримують.

Видавлювання (2145) зі скручуванням (2131) – суміщена операція отримання ГЗ та ШЗ шляхом штампування заготовки витісненням матеріалу через гвинтовий канал (рівчак) матриці з одночасним провертанням заготовки навколо її поздовжньої осі у зоні виходу із матриці за допомогою захвату, який здійснює обертовий рух та осьове переміщення вздовж осі заготовки (характерний приклад – Пат №US3337690).

Калібрування (2149) – операція підвищення точності форми та розмірів ГЗ, цільних і комбінованих ШЗ за зовнішнім та внутрішнім діаметрами, товщиною, кроком витків та зменшення шорсткості їх поверхонь (вигладжування) без використання механічної обробки зі зняттям стружки. Доцільно розрізняти калібрування на крок, калібрування бічних гвинтових поверхонь і калібрування поверхонь зовнішніх крайок витків ГЗ і ШЗ. Прикладом є технічне рішення (див. А.С. СРСР №751481), яке дозволяє виправляти форму ГЗ, що мають нагромаджену похибку кроку і викривлення в осьовому напрямку.

Калібрування (2149) зі зварюванням (9000) – комбінована операція утворення КШЗ, шляхом обтягування ГЗ навколо валу, до щільної посадки внутрішньої крайки витків на вал з наступним з'єднанням (зварюванням) внутрішньої кромки витка з валом.

Калібрування (2149) зі скручуванням (2131) та зварюванням (9000). Таку комбіновану операцію утворення комбінованих ШЗ здійснюють шляхом обтягування ГЗ навколо валу внаслідок розтягування заготовки з одночасним її поворотом навколо поздовжньої осі до щільної посадки внутрішньої крайки на вал з наступним її приварюванням до валу.

Волочіння (2152) зі скручуванням (2131) – це суміщена операція протягування заготовки (профілю або труби) крізь канал волоки за допомогою сили, яка спів направлена до напрямку руху виробу з одночасним провертанням частини заготовки навколо її поздовжньої осі.

Накочування (2153) – операція отримання цільних шнекових заготовок (ребристих труб) шляхом утворення на циліндричній заготовці гвинтових виступів, виконаних у вигляді різьби з кроком 1,5-2,5мм і кутом профілю від 40 до 300 висотою не більше 4,5 мм за рахунок неперервного кочення інструменту поверхнею деформованого матеріалу з вдавлюванням інструменту в матеріал заготовки і видавлюванням частини матеріалу у впадини інструменту.

Профілювання (2154) – операція отримання гофрованих ГЗ шляхом згину суцільної чи гофрованої смугової заготовки в поперечній площині що супроводжується відповідно утворенням або зміною форми асиметричних гофрів.

Вальцювання (2172) характеризується локальним вогнищем пластичної деформації, яке переміщається та змінною за шириною заготовки ступенем деформації, а також обертальним рухом деформуючої частини інструменту, обертальним або поступальним рухом заготовки.

Штампування імпульсне (магнітно-імпульсне) (2175) – високошвидкісне формування тонковиткової СГЗ незначного діаметру із КСЗ зі сплавів Д16АМ, АМГ16М у штампі між пуансоном із гвинтовою робочою поверхнею за допомогою дії імпульсного магнітного поля.

Штампування рідиною (гідравлічне штампування) (2181) – це формування порожнистої ШЗ шляхом осьового осаджування жорсткими пуансонами тонкостінної циліндричної

порожнистої заготовки і утворення за допомогою впливу тиску рідини (гідростатичного тиску) на таку заготовку гвинтових виступів і впадин релевантних гвинтовим рівчакам матриці.

Відповідно до розробленої багатоваріантної структури операцій отримання ГЗ і ШЗ здійснювали аналіз характеристик і меж використання згаданих процесів на основі використання показників технологічності [1, 2]. Як відомо, основними параметрами ГЗ і ШЗ є діаметри (радіуси) *D(R)* і *d*(*r*) зовнішньої і внутрішньої крайок витка, кут $\tilde{\theta}$ нахилу твірної витка відносно поздовжньої осі спіралі, товщина зовнішньої *h* та внутрішньої *H* крайок, крок *T* і висота витка *B*, середній кут $\alpha_{cp}$ підняття гвинтової лінії. Для виготовлення ГЗ і ШЗ найчастіше використовують початкові заготовки у вигляді валу, смуги товщиною $H_0$ і шириною $B_0$, кільцевої секторної заготовки (КСЗ), яка являє собою розгортку цілого або частини витка СГЗ на площині із зовнішнім $D_0$ і внутрішнім $d_0$ діаметрами крайок.

Ефективність технології виготовлення згаданих виробів визначають цілим рядом показників, до яких належить питома висота витка $b = B/H$, коефіцієнт $\psi$ нерівномірності витягування стрічки за зовнішньою і внутрішньою крайками витка спіралі; коефіцієнт $K_T$ кроку витка ГЗ: $K_T = T/D$; коефіцієнт $K_{BM}$ використання матеріалу; комплексний показник $F_m$ пластичності Гурвіча В.Є. [15] ( $F_m = \sigma_B \delta_5 / \sigma_T$, де $\sigma_B$ – границя міцності; $\sigma_T$ – границя текучості; $\delta_5$ - відносне видовження матеріалу); відносний радіус згину початкової заготовки $r / B$; коефіцієнт $K_G = \delta_h / \psi$ технологічності витків ГЗ.

**Результати дослідження**. Виготовлення вальцьованих ГЗ і ШЗ доцільно здійснювати на спеціалізованих ділянках в умовах крупносерійного і масового виробництв. Застосування поздовжнього вальцювання забезпечує зниження трудомісткості на 40-50% і витрати металу на 50-60% порівняно зі способом виготовлення зварних ГЗ. Наприклад, при виготовленні зварної ГЗ довжиною 3 м. (*D*=250 мм, *T*=250 мм) затрачається 3,2 год. робочого часу, а вальцьованої того ж розміру – 0,4 год.

Вихідним продуктом для формоутворення вальцьованих гвинтових заготовок (ВГЗ) способом поздовжнього вальцювання можна використовувати: прості сортові профілі (коло, квадрат, шестигранник, холоднокатана і гарячекатана травлена смуга, стрічка); фасонні сортові профілі: а) профілі загального призначення (кутник, тавр); б) профілі спеціального призначення (спеціальній профіль для шнеків, кільцеві секторні заготовки). Початковими заготовками у виробництві ШЗ є холоднодеформовані труби згідно ГОСТ 550-75, ГОСТ 9567-75, ГОСТ8734-75, ТУ 14-3Р-55-2001.

Секційні ГЗ виготовляють із вуглецевих сталей FE360B (S235JR/1.0037), FE430B (S275JR/1.0044), FE510B (S355JR / 1.0045), 08кп (AISI 1008, AISI 1010 ), 08ЮА (А620), 10кп нержавіючих сталей AISI304 (1.4301), AISI316L (1.4404), AISI316Ti (1.4571), AISI310S (1.4845), зносостійких сталей HARDOX 450/500, CREUSABRO 4800/8000, ROC 321/400, NAXTRA, DILLIDUR 450 B/500 B; ВГЗ отримують переважно із вуглецевих низьковуглецевих високопластичних сталей (FE360B (S235JR/1.0037), DD11 (FeP11), DD12 (FeP12)) та нержавіючих сталей AISI304 (1.4301), AISI316L (1.4404). У виробництві магнітопроводів використовують електротехнічні рулонні сталі, наприклад, марок 2013 і 3413 згідно ГОСТ 21427.1-83. Шнекові заготовки, які отримують способами поперечного, поперечно-гвинтового і поздовжньо-гвинтового вальцювання використовують у виробництві моно- і біметалічних високо ребристих труб (*B*>4,5 мм), ходових гвинтів, черв'ячних валів, роторів компресорів, труб з гвинтовими гофрами. Тому для їх виготовлення використовують сталі 8ХФ ГОСТ 5950- 2000 (62SiMnCr4), 50ХФА ГОСТ 14959-79 (AISI6145), 30Х3ВАТУ14-1-950-86, які піддають попередньому відпалу на зернистий перліт (сталь 8ХВ) або поліпшенню із стабілізуючим відпуском (сталі 50ХФА (6145) і 30Х3ВА), мають відповідно твердість НВ 150-179, НВ 196-223 і НВ 225-286. Вальцьовані ШЗ зі сталей 8ХФ, 50ХФА і 30Х3ВА мають твердість за профілем витків відповідно НВ 250-256, НВ 300-312 і НВ 308-320.

Основними способами формоутворення ВГЗ є*:* вальцювання (2172), комбіновані операції вальцювання (2172) зі скручуванням (2131), вальцювання (2172) з навиванням (2134), навивання (2134) з вальцюванням (2172), вальцювання (2172) з навиванням (2134) і калібруванням (2149).

Такі нормативні документи як ГОСТ 2705-73, ГОСТ 2037-82 регламентують виготовлення ВГЗ в інтервалі 20мм<*d*<121мм, 60<*D*<320мм зі смуг із $B_0$<100мм. Вітчизняні

© Пилипець М.І., д.т.н., Васильків В.В., д.т.н., Радик Д.Л., к.т.н., Пилипець О.М., к.т.н.

стани дозволяють отримувати такі заготовки в інтервалі розмірів $1.2 \geq T/D \geq 0.7$, зокрема на станах Х523 і Х540 $0.8 \geq d/D \geq 0.1$; $5 \geq H/h \geq 1.2$, 20мм$\geq B \geq$110мм, 90мм$\geq D \geq$700мм, 90мм$\geq T \geq$700мм, $H_{max}$=4-6 мм (матеріал заготовки сталь 08КП-0М ГОСТ503-81). На станах мод. ZL158-II та ZL258 фірми Shandong Tiema Machinery Co., Ltd можна отримувати ВГЗ в інтервалі параметрів відповідно: $H_{max}$=2-5 мм і $H_{max}$=2-10 мм; $B_{max}$=100 мм і $B_{max}$=150 мм; $d_{max}$=30 мм і $d_{max}$=60 мм; $D_{max}$=600 мм і $D_{max}$=800 мм. Використання стану вартістю 39 000у.о. фірми "Harbin Qiheng Trade" забезпечує отримання ВГЗ з $D_{max}$=50-200мм із низьковуглецевих сталей зі смуг $B_0$=20-100 мм, $H_{0max}$=5,5мм. Устаткування фірми "Tecnofer" (Італія) забезпечує виготовлення ВГЗ з параметрами $H/h \approx 2$, $T = D$, 65мм<$T$<200мм, 22мм<$d$<48мм, 21мм<$B$<76мм, 1,8мм<$h$<2,3мм.

Оцінку можливостей виготовлення ГЗ методом холодного вальцювання на устаткуванні визначених модифікацій здійснюють за допомогою показника $K_{pr}$ ($K_{pr} = D_B / T$, де $D_B$ – діаметр робочої поверхні вальця) конструктивних особливостей прокатних станів.

Тонковиткові ВГЗ отримують, як правило, в холодному вигляді (із зменшенням перетину збільшується тепловіддача, тому гаряча обробка ускладнена). Отримання широкосмугових ВГЗ із вуглецевих сталей і кольорових сплавів з товщиною витка менше 0,5 мм неможливо через розрив витків зі сторони їх зовнішніх крайок.

Для виготовлення ВГЗ у виробництві навивних магнітопроводів із $d_{min}$=10мм, $D_{min}$=150 – 180 мм використовують установки УНС – 3, УНС – 4, ГГ – 2416, Ю 5.980, АО – 683.000, ГГ – 2347, НМ – 12, НМ – 13М, НМ – 5М, НМ – 4М та ін. На них навивають стрічки товщиною 0.05…0.8 мм і шириною 2,5…50 мм із електротехнічних рулонних сталей 2013 ГОСТ 21472.2–75 і 3413 ГОСТ 214271–75.

При використанні способу вальцювання з не катаною зоною деформуванню піддають зовнішню по відношенню до центру кривизни частину заготовки, яка не перевищує 75% її вихідної ширини (а.с. СРСР №429872). Для попередження гофроутворень внутрішню кромку необхідно гальмувати, шляхом зміни кутової швидкості, обертання відповідної частини складених вальців та одночасно обтискувати на 3-5%, що складає 0,1-0,2 мм при існуючій товщині заготовок. Загалом такий спосіб забезпечує отримання ВГЗ в діапазоні параметрів: $D/B_0 \leq 2,6$; $d/D \leq 0,5$, $0.5 \geq d/D$, $\psi$ <2.5…2.7, $0,8 < T/D < 1,2$, $B/H \geq 25$мм 3,2мм< $H_0 \leq 5$мм.

Виготовлення ВГЗ гарячим способом доцільно здійснювати наскрізне нагрівання не катаної частини смугової заготовки до температури, яка не перевищує нижню критичну точку (до 500-600°С) (а.с. СРСР № 548338). Для зменшення не ідентичності витків за кривиною при використанні індуктора щілинного типу передній кінець смуги повинен мати температуру нижче решти частини на 30-50$^0$. Наприклад, із початкової смугової заготовки при $H_0$=2,5 мм, $B_0$=50 мм можна отримати ВГЗ зі сталі 08КП з параметрами $D_{-8}^{+5}$=150 мм; $T_{-10}^{+10}$=150 мм; $d_{-2}^{+2}$==20 мм; $h$=1 мм, ширина не катаної частини дорівнює 10мм. Однак, необхідно враховувати, що використання способу гарячого у порівнянні з холодним вальцюванням характеризується більшою на 25% трудомісткістю.

Виготовлення ВГЗ можна здійснювати зі смуг із трапецеподібним профілем із $\psi$ <1.8…2.2 і $B/H$>20, та із гіперболічним профілем $\psi$ >1.8. Для випадку $\psi < 2,6; B/H > 15, T/D < 1,3;\ 0,007 \leq K_T < 0,005,$ або $\psi$ <1,8 $B/H$>20 $T/D < 1,3;$ $0,007 \leq K_T < 0,005.$ Загалом $\psi \leq 1,6;\ F \geq 0,36;\ H/B \geq 0,02$ , ($B/H \leq 50$) коли $\psi \leq 2;$ $F \geq 0,46;\ H/B \geq 0,02; (B/H \leq 50)$, в іншому випадку $\psi \leq 2,3; F \geq 0,46;\ \psi \leq 2,6;$ $F \leq 0,61; H/B \geq 0,02\ (B/H \leq 50).$

Однак необхідно враховувати, що співвідношення між діаметром $d$ і діаметром вала, на який встановлюють ГЗ не повинно перевищувати 1,1…1,01. Для $\psi = 2,8…1,6$ $0,9 < T/D < 1...1,06$, а коли $\psi \to \psi_{\max} = 2,7$ необхідно проточувати або шліфувати зовнішні крайки на глибину 1,5…4мм через розрихлення зовнішньої крайки витка.

За умови діаметра вальців 320мм і обтискуванні за всією шириною початкової заготовки можна отримувати ГЗ з параметрами $H/h = 1,2…2,6;\ 0,07 \leq K_T \leq 1,3;\ \psi_{\max} \leq 2,7$;

© Пилипець М.І., д.т.н., Васильків В.В., д.т.н., Радик Д.Л., к.т.н., Пилипець О.М., к.т.н.

*2,5мм* $\le H <$ 6мм; $0,3 < K_T < 1,56$; $H_0 / H < 1,015...1,04$, $B/H$ =15…50.

У випадку $K_T \ge 1,2$ кут відхилення перетину спіралі від перпендикуляра до осі валу завжди перевищує допустиме значення. Тому у цьому випадку для виготовлення якісних виробів доцільно використовувати початкові кільцеві секторні заготовки або неперервно-секційні смугові заготовки.

Необхідно відзначити, що при отриманні спіралей зі зменшеним коефіцієнтом технологічності витків $K_G$ зростає складність формоутворення способом холодного вальцювання через можливість гофроутворень та руйнуванням заготовки. Допустима величина $K_G \ge 0,007$ . Умова ймовірності виникнення розриву зовнішньої крайки спіралі при сталому процесі обчислена Гурвічом В.Є.: $K_G$ <0,005 [15].

Отримання секційної ВГЗ із *1,2*< $K_T$ <*2* доцільно здійснювати із початкової заготовки, виконаної у вигляді тіла обертання з катеноїдною або іншою поверхнею (витягнутою катеноїдною конічною). Таку заготовку розрізають в радіальному напрямку і вальцюють між конічними одноопорними вальцями.

Однак при виборі такої технології необхідно враховувати, що вона характеризується на 40-50% більшою трудомісткістю і на 50-60% більшими витратами матеріалу у порівнянні зі способом вальцювання смугових заготовок.

Використання способу вальцювання з навиванням на оправу забезпечує отримання ШЗ ребристих труб із параметрами 0,4мм<*H*<0,6мм; *T*>2,5мм; B<16мм, *B/H*=32, матеріал – алюміній та його сплави (наприклад, АД1 ГОСТ 4784 -97 та закордонні марки АА 1135, 1145, 1230, 1235, ENAW-1235). В умовах масового виробництва доцільно використовувати устаткування на зразок верстата моделі ГД-99А. Зі смуг із трикутними вирізами можна отримувати ВГЗ із $\psi_s$ <2…2.2, де $\psi_s = L_h/L_v$ – коефіцієнт нерівномірності витягування суцільної частини, $L_v$ – довжина поздовжнього шару спіралі за вершинами вирізів; $T_в \le 1.5\ B_в$, де $T_в$ *і* $B_в$ – крок і висота вирізів; радіус округлень отворів $r_c$>0.6 $H_o$.

Для вальцювання довжина смугової заготовки повинна перевищувати 2500мм. Крім цього до розрахункової довжини на кресленні добавляють довжину одного витка через необхідність обрізування спотворених деформуванням вхідного і вихідного кінців ВГЗ.

Способами поперечно-гвинтового вальцювання отримують ШЗ як з одно- так і багатозахідними спіралями з параметрами: $\alpha_{ср} \le$ 13-15˚, довжиною не більше 12...15м, *B*<3,5-15мм, *T*=1,5-6мм, $H_c$=0,3-1,0мм, 60мм≤D≤120мм; $K_{BM}$ =98-99%.

На операції накатування виготовляють порожнисті ШЗ з низькими витками і Т=1,5-2,5мм і кутом профілю від 40 до $30^0$. Для цього використовують матеріали, які характеризуються коефіцієнтом відносно видовження, який перевищує 4%. Спосіб дозволяє отримувати цільні ШЗ з порожнистими витками *D*= 6-50 мм, $\alpha_{ср} \le$ 6–10 град. і товщиною стінки 0,25 – 0,8 мм будь якої довжини. Формоутворення здійснюють на спеціальних верстатах (наприклад, типу ХРПТ), або у спеціальних пристосуваннях на токарних верстатах.

Операція 2131 "*скручування"* забезпечує утворення: а) скручених із прямолінійних стрічкових заготовок; б) скручених СГЗ із КСЗ; в) цільних ШЗ з великим кроком із труб із прямими повздовжніми ребрами; г) цільних профільованих заготовок. Такі заготовки доцільно використовувати для виготовлення стрічкових завихрювачів енергетичних установок, свердел, спіральних лез протяжок і гвинтових різців, робочих органів блендерів тощо.

Для отримання скручених ГЗ та СГЗ із $\alpha_{ср} \ne const$ доцільно використовувати спосіб поділянкового скручування. При *D*=150-200 мм і *T*=130-220 мм виток можна виготовити з листового матеріалу із $H_0$=0,5-1,0мм. Спосіб скручування із одночасним прикладенням до кінця заготовки зусилля осьового розтягу дозволяє зменшити величину кута пружного розкручування після розвантаження заготовки.

Способи скручування в штампах можна ефективно використовувати при деформуванні початкових заготовок у вигляді симетричних фігур, у яких довжина лінії симетрії, рівна довжині кроку витка скрученої ГЗ, а криволінійні бічні сторони – рівні довжині гвинтової лінії зовнішньої крайки витка. Параметри таких скручених ГЗ: 0,5мм≤*H*≤1,0мм; 130мм<*T*<220мм; 150мм<*D*<200мм.

Для виготовлення вузьковиткових ГЗ із *B/H*<2, *d*<80мм; *T*<200мм, $\alpha_{ср} \le$ 20…40° та можливою

© **Пилипець М.І., д.т.н., Васильків В.В., д.т.н., Радик Д.Л., к.т.н., Пилипець О.М., к.т.н.**

криволінійною повздовжньою віссю такої заготовки з початкових профільованих прутків зі швидкоріжучих сталей (Р6М5, 3343, Т11302 та ін.) для попередження спотворення форми їх лезових частин доцільно використовувати спосіб скручування на оправі.

Отримання секційних ГЗ здебільшого здійснюють різними способами на операціях калібрування або формування. Вибір конкретного способу залежить від величини коефіцієнта кроку витка спіралі. Такий коефіцієнт є критерієм перпендикулярності перетину витка відносно до його осі. При *T/D* 1,3 кут відхилення перетину витка вальцьованої спіралі від перпендикуляра до осі валу завжди перевищує допустиме значення [15]. У цьому випадку має місце так званий "завал витка", тобто відхилення твірної гелікоїдної поверхні від перпендикуляра до осі спіралі. При виготовленні штампозварних ГЗ для яких $K_T$ =0,6…0,8 вважають, що деформація відбувається без значного витягування металу. Якщо величина $K_T > 0,8$, то у розрахунках розгортки витка використовують формули Вернікова Р.М.

Необхідно відзначити, що для гвинтових виробів, розміри яких регламентовані ГОСТ2705-73 та ГОСТ2037-82 $K_T$ =0,6…1,0. При конструюванні ГЗ для шнекових робочих органів враховують умову $K_T \geq$ (0,5...0,6), тобто крок витка вибирають з таким розрахунком, щоб кут гвинта спіралі не перевищував 9 ... 10° щоб уникнути заїдання гвинта.

Отримання ГЗ з нелімітованим значенням показника $K_T$ можливе у випадку виконання комбінованих СГЗ, які отримують способом зварювання між собою окремих СГЗ.

Недоліком такої технології є низький $K_{BM}$ . Наприклад, при виготовленні СГЗ із параметрами *D*=600±2мм; $H_o$=1.5…$H_o$=3мм; *d*=300мм, *T*=100±20мм, $K_{BM}$ <0,3. Тому її доцільно використовувати при отриманні СГЗ із $\psi$ =2,6…3; $\delta_5$<0,12…0,15; 22мм<*B/H*<80мм; $K_T \leq 0,7$ (холодна формовка), або *H*>4мм, *B*>80 мм (гаряча формовка).

Загалом коефіцієнт використання матеріалу у штампозварних спіралей у 1,3…2 рази нижчий ніж у вальцьованих чи навивних спіралей. Прийнявши матеріаломісткість штампованих СГЗ за одиницю, тоді відносна матеріаломісткість ВГЗ становить 0,3…0,4, вальцьованих – 0,25…0,3, навивних – 0,25…0,6.

З метою зменшення нерівномірного затискування (закушування) листової заготовки штампом та реалізації формовки тільки деформацією зсуву доцільно між робочими гелікоїдними поверхнями пуансона та матриці виконувати щілину розбіжною до центру внутрішньої гвинтової лінії відповідно до залежності Оніщенка А.К. [245]:

$$\delta = H - h = H_0\left(\left(\sin\alpha_H\right)^{-1} - \left(\sin\alpha_h\right)^{-1}\right).$$

Операцію *навивання* використовують для виготовлення НЗ із закритою або відкритою навивкою витків способами безоправкового навивання, дискретного чи неперервного навивання на оправу. Для розширення діапазону параметрів таких заготовок доцільно використовувати комбіновані операції: волочіння з навиванням, безоправкове навивання з навиванням на оправу, навивання зі зварюванням, вальцювання з навиванням, накочування з навиванням, навивання з профілюванням, навивання з розганянням.

Технологію безоправкового навивання можна здійснювати на профілезгинальних машинах, спеціальних верстатах (пружино навивальних автоматах), або спеціальних установках в умовах серійного і масового виробництв, коли програма випуску перевищує 12-15 тис. шт. Виготовлення НЗ із *B/H*≤2 і *D/d*<8 доцільно здійснювати на автоматах, оснащеними деформуючими елементами у вигляді не привідних роликів або штифтів (упорів).

Наприклад, для виготовлення двох- і трьохвиткових НЗ у виробництві дорожніх шайб із *d*=25мм використовують автомат моделі АВ0624, який забезпечує продуктивність 35…50шт/хв., а для спіралей із *B/H*<2,5, *D*=62…103мм – верстат моделі СНС (швидкість подавання стрічки – 8…16м/хв.).

У виробництві ГЗ поршневих кілець освоєний виробництвом діапазон: 40мм<*D*<150мм, $B/H \leq 6$, 0,5мм<H<5,36мм, *B*<8мм.

Виготовлення НЗ з дроту діаметром до 4 мм здійснюють на автоматах безоправковим методом. Спосіб гарячого деформування таких заготовок використовують якщо діаметр їх поперечних перетинів перевищує 8мм. Спосіб навивання на роликових профілезгинальних машинах доцільно використовувати у процесі виготовлення таких заготовок з параметрами *B/H*≤5...6 зі стальних матеріалів та при 3,6< $B/H$ <21 і 2,9< $r/B$ <7,5 із кольорових сплавів.

© **Пилипець М.І., д.т.н., Васильків В.В., д.т.н., Радик Д.Л., к.т.н., Пилипець О.М., к.т.н.**

Наприклад, на трьохроликовій машині стійкий процес навивання спостерігається при гнутті на ребро смуги (матеріал: сталі Х18Н10Т, AISI321, 321H, S32100, S32109) з параметрами $B$=30мм, $H$ =8мм, ($B/H$ =3,6) на внутрішній радіус 177мм ($r/B=5,92$). У процесі виготовлення ГЗ зі сплавів АМг5, АА5056, 3.3555, AlMg5 із $B/H$ =21,15, $r/B=7,52$; для $B/H$ =13,1, $r/B=2,91$; для $B/H$ =17,8 $r/B=3,27$.

Виготовлення НЗ з трапецеподібним профілем поперечного перетину витка можна ефективно здійснювати на профілезгинальних верстатах серій DS, DELTA, ALFA, PK, HPK. Нами виділено такі групи розмірних рядів таких заготовок, які характеризуються параметрами в інтервалах: для $B/H\le 6$ перша група: $3,7\le R_{o\min}/B<10$, друга група $10\le R_{o\min}/B<17$; для $6<B/H\le 9$ перша група: $3,5\le R_{o\min}/B<10$, друга група $10\le R_{o\min}/B<15$, де $R_{o\min}$ – мінімальний радіус плоского витка. Трьохвалкові листозгинальні машини (наприклад машини серії MRM), які оснащені інструментами для згинання смуг, кутників, швелерів тощо дозволяють отримувати НЗ в діапазоні параметрів $B/H\le 5$, $12<R_{o\min}/B<30$.

Виготовлення НЗ із L-подібним профілем поперечного перетину витка із ребром всередину та 300мм$\le d_0<$1200мм, $B/H$<2,5, $H$>28мм можна ефективно здійснювати на фланцезгинальних машинах. Аналогічні заготовки із зовнішнім ребром можна отримувати на профілезгинальних верстатах в таких інтервалах розмірів: для $B_v/H\le 4$ перша група: $4<R_{\min}/B_v\le 12$, друга група $12\le R_{\min}/B_v\le 28$; для $4<B_v/H\le 12$ перша група: $4<R_{\min}/B_v\le 12$, друга група $12\le R_{\min}/B_v<30$. Формули справедливі також для $B_v=B_h$, де $B_v$ і $B_h$ - розміри полиць кутового профілю.

Технологічні способи навивання з паралельним розміщенням осей ролика та оправи забезпечують утворення НЗ з параметрами $B/H$ =3…4, $d/B$=2…3,3. У випадку використання алюмінієвих сплавів $B/H\approx 5$, $d/B$ =3,3. При навиванні смуг на гвинтові оправи ширину і глибину розраховують відповідно за формулами $B_k$ =(1,16-1,2)$H_0$ мм, $B_c$ =(0,5-0,7)$B_0$ мм.

В окремих випадках можна використовувати способи, які реалізують кінематичну схему обертання натискного ролика навколо нерухомого опорного елемента. Область використання такого рішення обмежується параметрами НЗ: $D$<100мм, $K_T\le 0,6$.

Отримання НЗ із закритою навивкою забезпечуються: а) закручуванням заготовки навколо її осі в процесі навивання; б) осьовим зусиллям підтискування навитих витків у процесі згинання стрічкової заготовки; в) загинанням стрічки навколо обкочувального ролика.

Серед таких технологій найефективнішим є спосіб навивання стрічкових заготовок з перпендикулярним розміщенням осей ролика та оправи, який забезпечує отримання НЗ із закритою навивкою з параметрами: $K_T$ =0…2, Н>1,5мм, $d/B>1...1,6$; $\delta_5>0,5(\sqrt{\psi-1})$; $B/H\le$ 15-20 $\psi$ <2,7 (при $\psi$ <1,8 процес деформації стійкий) $D$>320мм. Відносною особливістю такої технології є те, що $h_n/h_{np}>1,5...3$, де $h_n$ і $h_{n.p}$ товщини зовнішньої крайки відповідно НЗ і ВГЗ. Крім цього, відхилення отриманих НЗ за зовнішнім діаметром в діапазоні розмірів згідно ГОСТ 2705-73 в 2...2,5 рази менші ніж ВГЗ, а зміна кроку гвинтової стрічки в 2,5...3,2 рази менші. До техніко-економічних переваг такої технології також відноситься можливість отримання спіралей з мінімальним внутрішнім діаметром $d_{min}$=8...12 мм, виготовлення яких вальцюванням не можливе. Однак для попередження втрати стійкості та гофроутворень при навиванні смуги ребром на оправу необхідно підтискати сформовану заготовку в осьовому напрямку із силою $P_{oc}$=(0,7-1,1)$P$, де $P$ – сила згину смугової заготовки.

Найбільшого значення $\psi$ ($\psi$ >2,8) можна досягнути шляхом згинання на ребро попередньо підготовленої профільної смуги з трикутними вирізами за внутрішньою крайкою, які в процесі формоутворення змикаються.

У процесі навивання початкових смугових заготовок із трикутними вирізами можна отримувати широковиткові НЗ з параметрами $B/H$ =15…30; $\psi$ =25…35; $K_T$ =0…1,5. Відносною особливістю такої технології є те, що співвідношення між енергозатратами виготовлення гвинтових заготовок на операціях вальцювання і навивання не перевищує 3-7 одиниць. При цьому потужність електродвигуна установки для навивання вибирають залежно від параметрів початкової заготовки:

© Пилипець М.І., д.т.н., Васильків В.В., д.т.н., Радик Д.Л., к.т.н., Пилипець О.М., к.т.н.

для холоднокатаної стрічки товщиною 1 мм – 4,5кВт, а гарячекатаної товщиною 1,5мм – 9кВт.

Навивні заготовки з не пружинних сталей, які виготовлені способом неперервного навивання смугових заготовок на оправи характеризуються параметрами: $B/H$ =5…15; $H$>2 мм, $\psi$ <2,5мм; $B/d$< 0.4; $K_T$ =0…2,5, $B/r$ <0,6…0,8.

Одним із способів отримання комбінованих шнекових заготовок (КШЗ) є навивання смуги на порожнисту заготовку з нагріванням струмом ВЧ і її осаджуванням під дією радіального зусилля $P_{oc}$. При цьому до вільного кінця смуги прикладають також зусилля натягу $P_{нат} = (0,07...0,075) H_0 B_0 \sigma_s$. Наприклад, для навивання смуги із $H_0$=*1мм,* $B_0$=*12мм* зі сталі 20 на трубу діаметром 32мм і товщиною 5мм необхідно подавати струм високої частоти 0,44МГц ($U_A = 8-8,2кВ$, $I_A = 11,5-12А$) швидкість зварювання 9 м/хв., $P_{нат} = 250Н$, $\sigma_s = 280Н/мм^2$, $P_{oc} = 400Н$. У випадку навивання смуги 25х1,3 з трикутними просічками висотою 12мм та довжиною основи 4мм зі сталі 20 на трубу діаметром 42мм і товщиною 6мм з нагрівом генератором ВЧС 2-160/0,44 зусилля осаджування 1500-2000Н, швидкість зварювання 9,5 м/хв., потужність 110кВт.

Для виготовлення довгомірних КШЗ способом вальцювання з навиванням на оправу та приварюванням можна використовувати установки для спірального оребрення труб. Наприклад стан АСОТ-2 забезпечує отримання КШЗ із $D$=20...60 мм і $H$=2...8 мм, $B$=6...24 мм; $T$= 4...15 мм; швидкість приварки стрічки до 27м/хв., а стан АСОТ-4 – $D$=73...168мм.

Операцію "*Навивання із розганянням"* доцільно використовувати при виготовленні вузьковиткових спіралей малого діаметру у яких $B/H \le 2$. Наприклад, для виготовлення із молібдену марки МС ОСТ11021.004-76 ГЗ з параметрами $d$=20 мм, $B$=1,35м; $H_c$=0,42 мм необхідно використовувати пруток діаметром 0,97 мм, та інструмент, у якому кут між калібруючими поверхнями бойків дорівнює 2,29°.

На операції *2145 видавлювання* можна виготовляти ШЗ у виробництві бурильних штанг і роторів компресорів із вітчизняних вуглецевих сталей марок 20, 35, 45, 50 та закордонних 1020, 1023, 1.1151, 2С22, 1034, 1035, 1044, 1045, 1049, 1050, конструкційних сталей 30ХГСА, 40ХН та 30ChGSA, 30HGS, нержавіючих сталей 12Х18Н9Т, AISI321. Спосіб характеризується $K_{BM}$ =75-90%. Способом прямого видавлювання можна отримувати порожнисті ШЗ і ГЗ, зворотним видавлюванням – порожнисті ШЗ із охоплюваними витками. Для виготовлення СШЗ перспективним є використання способу радіального видавлювання.

Прямим видавлюванням доцільно отримувати ШЗ із багатозахідними витками та $D$=30-200мм., $H_c$=3-40мм, $B<D/4$, $\alpha_{cp} \le 60°$ а також скручені ГЗ із $B/H$ <12. Матеріал заготовок – вітчизняні сплави Д1, Д16, АМц, АД31 та закордонні ENAW-1235, ENAW-Al99.35, AA1135, 2024, AA2024, AA6060, AA6063. Швидкість витікання матеріалу 1-1,5 м/хв. (для сплаву АВ ГОСТ 4784- 97 та її закордонних аналогів AA6151, JIS6151) 6-15 м/хв., для D1 2-8м/хв. При використанні сталі 45 для ШЗ $\alpha_{cp} \le 25^{\circ}$.

Способом гідростатичного видавлювання дюралюмінію можна отримувати ШЗ із параметрами $B/H$<8, $\alpha_{cp} \le$ 50-60°. При видавлюванні ШЗ із алюмінієвих сплавів (наприклад, AD31) попередньо заготовку необхідно нагрівати до температури 450-500$^0$С – вище температури рекристалізації матеріалу сердечника.

На операції видавлювання зі сталі і алюмінієвих сплавів також можна ефективно отримувати гелікоїдні та СГЗ з параметрами $D$=250…800мм, $H$=1,5…12мм, $B_{max}$=250…300мм; $B/H$ <35, так як відхилення радіуса кривизни від заданих величин не перевищує 3,5%. Швидкість видавлювання 3-6 м/хв. (вуглецеві і низьколеговані сталі), 1-2 м/хв. (високо леговані сталі). При використанні матеріалів AD31, Д1 та AA6060, AA6063, AA1145, AA1135 технологію можна використовувати при виготовленні скручених ГЗ з параметрами: $H$=2-4 мм, $B$=20-50мм, кут закрутки 10-30 рад/м.

В умовах одиничного виробництва для виготовлення ГЗ доцільно використовувати операцію *гнуття*, яку можна реалізувати на універсальних листоштампувальних пресах, спеціальних згинальних пресах, горизонтальних і вертикальних згинально-штампувальних пресах та іншому устаткуванні.

Виготовлення ШЗ на суміщеній операції *волочіння зі скручуванням* здійснюють способами: а) скручування заготовки у зоні виходу із волоки за допомогою встановленого на

вагонетці волочильного стану захвату, який здійснює обертовий рух та осьове переміщення; б) скручування заготовки за рахунок примусового обертання волоки з гвинтовим каналом без або з одночасною роздачею заготовки; в) скручування заготовки зі сторони її входження у волоку, наприклад, під дією колових зусиль, прикладених до заднього кінця заготовки; г) скручування заготовки між дистанційно розміщеними волоками, одна з яких є нерухомою, а інша, яка оснащена гвинтовим каналом, здійснює примусове обертання.

Швидкість волочіння 40-100 мм/хв. - 15м/хв., зусилля волочіння 50Н-1500кН. Матеріал ГЗ і ШЗ - алюмінієві сплави АД31, АД31Т1 і АА6060, АА6063 згідно EN 573, мідні сплави М3, С14200. Параметри заготовок – $D$<400мм, кут підняття гвинтової лінії 15-45°, $B/H$<6. Початкові заготовки для волочіння – це суцільні (катані або пресовані) круглі і фасонні профілі, безшовні чи зварні труби.

На операції 2122 висаджування доцільно отримувати СШЗ, у яких В<15мм, Lz/D≤2,5. Для покращення вилучення заготовки із штампу, стінки отворів виконують з нахилом 1˚30′-7˚.

Калібрування застосовують як окрему операцію оброблення ГЗ і ШЗ, або як технологічний перехід операції отримання КШЗ. Можна виділити способи поверхневого та об'ємного калібрування, наприклад, в рівчаках штампів або зі застосуванням калібруючих втулок. Гвинтові заготовки, суцільні та КШЗ, які виготовлені із легованих і вуглецевих сталей з вмістом вуглецю понад 0.2% необхідно піддавати попередній термічній обробці (нормалізації, відпалу). А такі заготовки зі низьколегованих сталей, із вмістом вуглецю до 0.2%, а також із алюмінієвих сплавів D1 і АК6 калібрують без попередньої термічної обробки. Існуючі технологічні способи дозволяють отримувати калібровані НЗ з параметрами: В/Н=5…20; $\psi$ =15…35; $K_T$ =0,4…3.

Технологію штампування рідиною (гідравлічне штампування) (2181) доцільно використовувати при виготовленні ШЗ з порожнистими тонкостінними витками із заокругленими крайками при $K_{BM}$ <96%. Матеріали заготовки – мідь, алюміній, вітчизняні сталі 12Х18Н10Т, 10, 20 та закордонні AISI321, AISI1010, AISI1023. Область використання технології: $B/H$ <4, $D$<50 мм, $L_Z$<200 мм.

Основною операцією виготовлення КШЗ із СГЗ та зварних ГЗ є комбінована операція формування, встановлення і закріплення багатовиткової ГЗ на валу. Часто її реалізують за допомогою вилкових, гребінкових та пальцевих пристроїв. Особливістю таких технологій є відсутність необхідності у використанні спеціального спорядження для кожного типорозміру КШЗ, та можливість виготовлення таких виробів зі змінним кроком. У виробництві використовують дві групи способів. Перший ґрунтується на тому, що встановлену на вал зварну ГЗ, піддають калібруванню з одночасним приварюванням. У другій групі способів здійснюють почергове приварювання КСЗ або СГЗ з одночасним калібруванням на крок та приварюванням до валу.

Перспективними є розробка та реалізація комбінованих процесів отриманих на основі поєднання процесів обробки металів тиском з процесами технологічних методів лиття металів і сплавів, порошкової металургії, адитивних технологій, зварювання, формування з полімерних матеріалів, кераміки та гуми, складання та ін.

**Висновки.** У рамках системного підходу дано постановку задачі про вдосконалення технологічних процесів отримання гвинтових виробів на основі впровадження комбінованих процесів формоутворення гвинтових і шнекових заготовок. Наведено термінологічний опис основних простих процесів формоутворення гвинтових і шнекових заготовок методом обробки металів тиском. На основі використання показників технологічності визначено межі використання згаданих процесів. Наведено марки матеріалів, які використовують для виготовлення ГЗ і ШЗ у виробництві виробів різного функціонального призначення. Описано відомі комбіновані процеси формоутворення таких деталей. Отримані результати можуть бути використані для синтезу комбінованих процесів отримання гвинтових виробів.

**Список використаної літератури:**

1. Пилипець Михайло Ількович. Науково-технологічні основи виробництва навивних заготовок деталей машин: Дис... д-ра техн. наук: 05.02.08 / Тернопільський держ. технічний ун-т ім. Івана Пулюя. - Т., 2002. - 445 арк.

2. Васильків, В.В. Розвиток науково-прикладних основ розроблення технологій виробництва гвинтових і шнекових заготовок з використанням уніфікації: дис. ... д-ра. техн. наук: 05.02.08 / Василь Васильович Васильків; Нац. ун-т «Львів. політехніка». – Львів, 2015. – 312 с.

**© Пилипець М.І., д.т.н., Васильків В.В., д.т.н., Радик Д.Л., к.т.н., Пилипець О.М., к.т.н.**

3. Rogatinskiy R., Hevko I., Gypka A., Garmatyk O., Martsenko S. Feasibility study of the method choice of manufacturing screw cleaning elements with the development and use of software. Acta Technologica Agriculturae // Nitra, Slovaca Universitas Agriculturae Nitriae, 2017. - № 2, P. 36-41.

4. Duraipandi R., Manikandan S. Ganesan S & Production team of Zone Eversendai construction private limited; Helicoidal screw fabrication in trichy factory. India. 12-06-2016

5. Jerry L. Straalsund; Samuel F. Harding; Dirk M. Nuernbergk; and Chris Rorres Experimental evaluation of advanced archimedes hydrodynamic screw geometries. ASCE Journal of Hydraulic Engineering, 2018.

6. Cheng C., Chen W., Yang J., Study on the reel mower helical blade by reverse engineering, 7th Int. Symp. Mach. Mecha. Agr. Biosystems Eng. (2014) Poster. (прокатка)

7. Jian Zhong Zhang, Lei Zhao, Fang Fang, Fei Yang Research on Cutting Methods for Conical Spiral Blade Applied Mechanics and Materials (Volumes 341-342) July 2013

8. Li Zheng Feng, Zhu Juan. Design and Calculation of Helical Blade Drawing Machine. Coal Mine Machinery, 2009Vol. 30No. 11, Nov.

9. Tan Chung Ming, Gin Yei Lin. An innovative compression mold design for manufacture of reel mower helical blades. Applied Mechanics and Materials, vol. 851, Trans Tech Publications, Ltd., Aug. 2016, pp. 255–258.

10. Nkakini S. O., Yabefa B. E. Design, fabrication and evaluation of a spiral blade lawn mower, Eur. Int. J. Sci. Technol. 3(4) (2014) 165-172.

11. Li Zheng Feng, Li Qiang Jiang. Design of Combined Helical Blade Manufacturing Device. Advanced Materials Resear ch, vol. 753–755, Trans Tech Publications, Ltd., Aug. 2013, pp. 1386–1390.

12. Zhou Zhe Bo, Tong Jie Zhang, Liang Chen, Chao Yin, and Jian Xu. Study on molding processing method of new type shotcrete machine helical blade. Advanced Materials Research, vol. 787, Trans Tech Publications, Ltd., Sept. 2013, pp. 572–576.

13. Zhang, JZ, Zhao, L., Fang, F., & Yang, F. Research on cutting methods for conical spiral blade. Applied Mechanics and Materials, (2013) 341–342, 482–484.

14. Гевко Б. М. (1986) – Технология изготовления спиралей шнеков. Вища школа, – 128 с., Львов.

15. Гурвич В.Е. Оценка технологичности изготовления холодной прокаткой спиралей шнековых транспортеров / В.Е. Гурвич // Тракторы и сельхозмашины. – 1987. - №10. - С. 51-54.

16. Feng Guang- liang1, Bai Yin-shan. Some Moulding Ways of Spiral Vane. Coal Mine Machinery, 2006 Vol. 27 No. 9.

**Mykhailo Pylypets, Vasyl Vasylkiv, Dmitry Radik, Oksana Pylypets**
Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine

## PREREQUISITES OF CREATING COMBINED OPERATIONS MANUFACTURING SCREW FLIGHTS AND HELICOID SCREW BY METAL FORMING

*The problem of improving technological processes for obtaining screw flights and helicoid screws in the production of screw products based on the development and effective use of combined operations of the method of metal forming has been formulated. A terminological description of the main simple processes of shaping such blanks by the method of metal pressure processing is given. Based on the use of manufacturability indicators, the boundaries of the use of the mentioned processes are determined. The results obtained can be used for the synthesis of combined processes for the production of screw flights and helicoid screws.*

**Keywords:** *combined operation, screw flight, helicoid screw, rolled helicoid flight (continuous auger flighting, helicoid flighting, helicoid flight, continuous flighting), sectional screw flight, screw flight blank, twisted tape, flat pattern of screw flight, screw flight welded, corrugated screw flight.*

**© Пилипець М.І., д.т.н., Васильків В.В., д.т.н., Радик Д.Л., к.т.н., Пилипець О.М., к.т.н.**

**Михаил Пилипец, Василий Васылькив, Дмитрий Радык, Оксана Пилипец**
Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя, Украина

## ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ СОВМЕЩЕННЫХ ОПЕРАЦИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛОПАСТЕЙ И ГЕЛИКОИДАЛЬНОГО ВИНТА МЕТОДОМ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

*Сформулирована проблема совершенствования технологических процессов получения винтовых лопастей и геликоидальных винтов при производстве винтовых изделий на основе разработки и эффективного использования совмещенных операций метода обработки металлов давлением. Дано терминологическое описание основных простых процессов формовки таких заготовок методом обработки металла давлением. На основании использования показателей технологичности определены границы использования указанных процессов. Полученные результаты могут быть использованы для синтеза комбинированных процессов производства лопастей и геликоидальных винтов.*

**Ключевые слова:** *комбинированный режим, винтовая лопасть, геликоидный винт, катанный геликоид (непрерывный лёт шнека, геликоидный лётный ход, геликоидальный лётный ход, непрерывный лётный ход), секционный винтовой лёт, заготовка лопасти винта, витая лента, плоскость лопастной лопасти, шнековая лопасть сварная, гофрированный винтовой вылет.*

**© Пилипець М.І., д.т.н., Васильків В.В., д.т.н., Радик Д.Л., к.т.н., Пилипець О.М., к.т.н.**

УДК 621.91:621.396.6
**Prydalnyi B.I.**
Lutsk National Technical University

# MECHATRONIC CLAMPING MECHANISM WITH ELECTRO-HYDRAULIC ACTUATOR FOR MACHINE SPINDLE UNITS

*The design of the clamping mechanism for fixing workpieces and tools in the spindle assemblies of machines that is equipped with an additional subsystem to provide the possibility of programmable settings to the required clamping force is presented. The electronic unit and electromechanical energy converters provide the possibility of reconfiguration by reprogramming the clamping mechanism according to the different tasks comparatively easily. The obtained results help to expand the functionality of clamping mechanisms, and consequently the functionality of machine tools and their technological flexibility.*

**Keywords:** *electro-hydraulic actuator, spindle unit, clamping chuck, transmission-amplifying mechanism, translational motor*

**Introduction and problem statement.** There is a trend in the development of the new machines generation where an increasing number of functions are transferred from mechanical components to intelligent. This tendency forms the basis for the creation of new machine control systems and enhances the possibility usage of information technologies in technical spheres. Electronic and electromechanical units can be reprogrammed according to the different tasks comparatively easily [1]. This helps to expand the functionality of machine tools and their technological flexibility. Simultaneously with the development of technologies, components of machine tolls that run in different types of energy and have different physical nature, such as mechanical, electrical, electromechanical, electronic, information etc, are merging gradually into a single structure [2]. Devices like that are able to perform movements of executive-level elements (final control elements) autonomously without connection with an upper-level control system in a technological machine due to the implemented computing processors into their structures [3].

Mechanisms for fixing workpieces and tools in spindle assemblies of modern machines need possibilities of optimal adjustment in accordance with the machining requirements, as well as the possibility of effective readjustment for providing technological flexibility. In particular, it is an important task to clamp objects made of materials with unique characteristics, and with diameters and magnitudes of their deviations different from their nominal values, providing nominal characteristics of clamping. The use of electric energy converters instead of their mechanical functional analogues in the components of technological machines allows achieving a number of advantages associated with a wide range of control and adjustment. There are designs of clamping mechanisms for fixing workpieces and tools in the spindle assemblies of machines that are equipped with additional kinematic chains and systems to provide the effect of self-adjustment on the diameter of the object for clamping [4].

There are known devices for clamping workpieces, which are installed in the spindle assemblies of metalworking machines and provide stabilization of the clamping force, even when the deviations of workpieces diameter relative to their nominal size are increased. An example of such a device is the device for clamping a workpiece with the shape of a rod [5], containing the conical sleeve, levers that are kinematically connected to the movable sleeve, the disk and the nut mounted on the drawetube (drawbar in form of a tube). The clamping mechanism is equipped with spring-loaded wedges with chamfers at the ends and the cylinder with the conical flange at one end of the inner surface. On the disk and the nut radial inclined grooves are made, in which the wedges are installed. In addition, the cylinder is attached to the conical sleeve and its conical flange is designed to interact with the chamfers of wedges. The disadvantage of this device is its relatively low reliability when working in automatic mode and the complexity of the design. As a promising design should be noted clamping mechanism for workpieces and tools [6] with a translational motor. The motor stator is located on the machine body and includes several electromagnets that are able to interact with electromagnets on the motor armature by an electromagnetic field. The magnets ate powered by a generator. The rotor of the generator is attached to the spindle and its stator is mounted on the machine body. The clamping collet is located on the end of the spindle and has the possibility to interact with the armature of the motor through the drawtube.

**© Prydalnyi Borys, Ph. D. in Technical Science, Associate Professor**

One of the most advanced is the device for clamping tools and workpieces that is installed on spindle assembly of the machine tool [7] is known. The clamping mechanism contains a screw transmission and the collet chuck for tools or workpieces. The screw transmission includes the transmission nut which is connected to the rotor of the electromechanical system, placed coaxially with the spindle with the possibility of rotation and longitudinal movement in both directions. The transmission nut has the possibility of force interaction with small-diameter hydraulic plungers through the axial bearing. The small-diameter hydraulic plungers located in the distributing sleeve create fluid pressure in the closed hydraulic system. The fluid pressure acts on coaxially located outlet plungers of a larger diameter, transmitting forces to the spring-loaded movable conical sleeve of the collet chuck. The disadvantage of this mechanism is the complexity of the design, the relatively high complexity of the control process when working in automatic mode and the relatively low reliability of work in conditions of contamination of the working surfaces of its screw transmission.

**The main objective of the study.** The purpose of research is determined by the need to eliminate the shortcomings of existing mechanisms for clamping workpieces and tools. The presented designs of mechanisms have the following common disadvantages:

– energy consumption while workpieces or tools are retained in the clamped state during machining;

– the high possibility of fluctuations in the magnitude of the clamping force due to uncontrolled changes in the voltage in the supply network;

– uncontrolled release of workpieces or tools due to accidental power loss;

– relatively small magnitude of the clamping force, which can be achieved due to the step-by-step interaction of the magnetic elements of the stator and rotor under conditions of limiting the diametrical overall size of CM;

– low rigidity of fixing the workpieces due to the presence of an elastic connection of the magnetic interaction in the kinematic chains, which provides the retention of the clamping forces during machining.

The major goal of the next research is to develop the design of a clamping mechanism for fixation workpieces and tools on spindle assemblies with the purpose to increase the magnitude and stability of the clamping force, as well as the reliability, efficiency and possibility of adjustment of the clamping.

**Results of work.** The problem is solved due to the fact that the device for clamping the rod stack and cylindrical tools is equipped with transmission-amplifying mechanism. The element of wedging mechanism in the form of a ball has the possibility of simultaneous force interaction with the respective shaped surfaces of the armature of the motor, spindle and at least one plunger of small diameter located in the spindle. When the plunger of small diameter is moving a pressure of the working fluid in the closed hydraulic system is created and acts on at least one plunger with a larger diameter. The plunger of a larger diameter transmits the force to the spring-loaded movable conical sleeve of the collet chuck.

For solving the task the new design of the CM is developed. The device contains (Fig. 1, 2) electromagnets 3 placed on the surface of rotor 2 which is movable in the axial direction and mounted on spindle 1. They have the possibility of electromagnetic interaction with electromagnets 5 mounted on stator 4. Electromagnets 5 is supplied by electricity through connectors 6. Electromagnets 3 are powered by electricity from rotor 7 of the generator which is fixed on spindle 1. Stator 8 of the generator is rigidly attached to machine body 9 and has the ability of powering through connectors 10. Stator 4 is rigidly attached to machine body 9 and armature 2 has the possibility of force interaction with at least one element 11 of the wedge mechanism in the form of a ball. Ball 11 also has the possibility of simultaneous force interaction with spindle 1 and the shaped surface of at least one plunger of small diameter 12 located in spindle 1. Plunger of small diameter 12 has the ability to move axially and force interaction with spindle 1 through spring 13 and working fluid 14 of a hydraulic system, which is also equipped with at least one plunger of a large diameter 15. Large-diameter plunger 15 is axially displaced and forcefully interacts with the axially movable conical sleeve 16. Sleeve 16 is also capable of simultaneous interaction with collet 17 that is rigidly attached to spindle 1 and holding object 18.

**© Prydalnyi Borys, Ph. D. in Technical Science, Associate Professor**

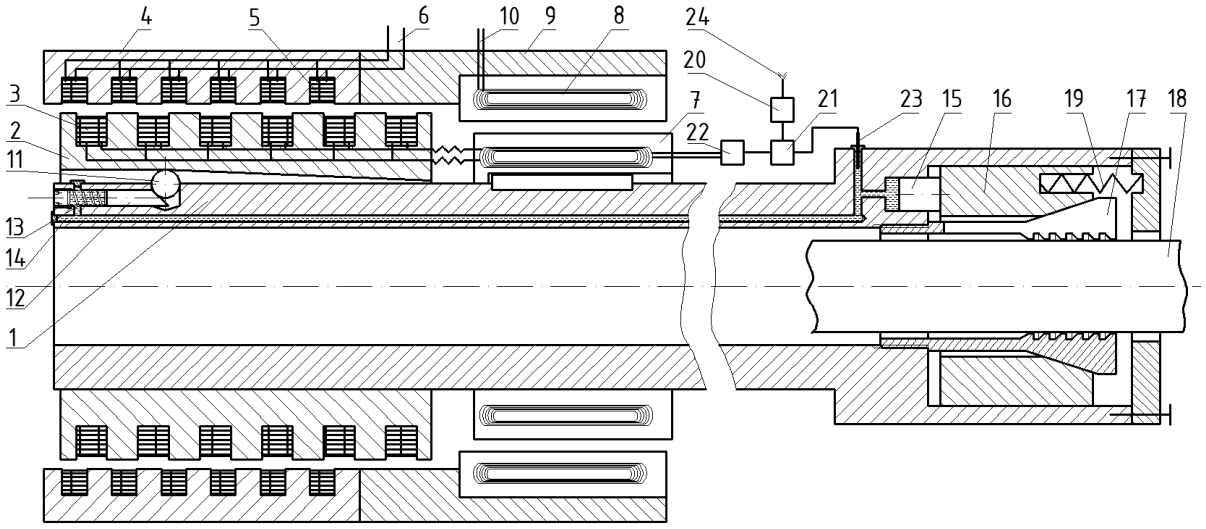



Figure 1– The mechatronic device with electro-hydraulic actuator for clamping objects in spindle units

The operation of the developed device for clamping cylindrical objects in the spindle assemblies of the machines is as follows. To clamp cylindrical object 18 (Fig. 1) electromagnets 5 are supplied alternately with current via connectors 6. As the result, around electromagnets 5 an electromagnetic field is alternately formed that interacts with one of the nearest electromagnets 3 on armature 2. It causes the axial motion of_armature 2. When current is applied to connectors 10 of the stator's windings 8 of the generator, there is a magnetic field under the action of which a current is generated in rotor 7 of the generator. The current from rotor 7 is supplied to electromagnets 3. From electromagnets 3 axial force is transmitted to armature 2 and induce its axial movement relative to stator 4. Armature 2 is equipped with the shaped surface at an angle α (Fig. 1, 2) to the axis of rotation. Due to the interaction of armature 2 with ball 11 there is its radial movement and force interaction of ball 11 with the shaped surface of plunger 12. The interaction causes the axial movement of plunger 12, the deformation of spring 13 and, as a consequence, the movement of part of working fluid 14 through the channels of the closed hydraulic system into the chamber of plunger of the larger diameter 15. As a result, plunger 15 is pushed out of its working chamber and transmits force to conical sleeve 16 causing it to move and interact with the conical surface of collet 17. There is deformation of spring 19. The force interaction of sleeve 16 with collet 17 causes the convergence of its clamping jaws and clamping of object 18. The magnitude of angle α is less than the friction angle in the contact of surfaces of ball 11 and armature 2. That fact allows preventing the movement of armature 2 relative spindle 1 under the force influence of ball 11. This provides the self-braking effect in CM and, as a consequence, the sustained clamping state of object 18 without consuming electricity by electromagnets 3 and 5. The self-braking effect can also be used to increase the reliability of maintaining clamped state during machining with a significant reduction of energy consumption. The magnitude of the axial displacement of armature 2 depends on the actual diameter of object for fixation 18. The displacement stops when the required value of the clamping force is reached and the force opposing its axial displacement is increased to its maximum. The maximum magnitude of the clamping force of object 18 depends on the amount of current supplied to the electrical connectors 6 and 10.

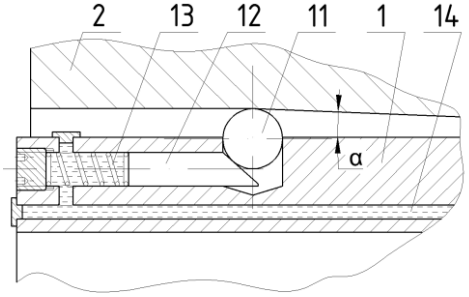



Figure 2– The wedging mechanism element and the plunger of the hydraulic system in the spindle

© Prydalnyi Borys, Ph. D. in Technical Science, Associate Professor

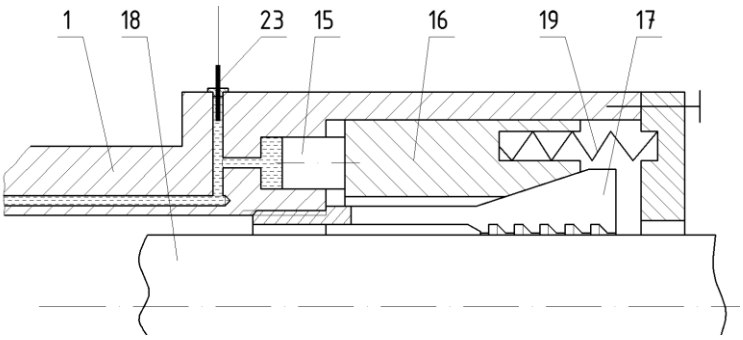



Figure 3– Fragment of the clamping chuck with drive plungers of the hydraulic system

The magnitude of the force for clamping object 18 is determined by the magnitude of the mechanical stress of the elements of the mechanism. It is reflected in the pressure of working fluid 14 in hydraulic system of the developed mechanism. Controlling the amount of clamping force makes it possible to avoid defects during machining, which may be the result of uncontrolled movements of the workpieces or tools under the action of cutting forces. Furthermore, it allows to avoid plastic deformations of workpieces made of comparatively soft or thin-walled materials. A control system where the signal about pressure in hydraulic system is used to determine the amount of clamping force is proposed.

The developed control system includes hydraulic pressure sensor 23 (Fig. 4) installed in the hydraulic system near the chamber of plunger of larger diameter 15. Before the clamping process, the magnitude of the control signal $L_i$ from the control panel is transmitted to memory device 20 (Fig. 4) and recorded at its lower level. The control system also consists of data comparison device 21 and relay element 22 with a logic output. After the clamping process starts the value $L_i$ is rewritten at memory device 20 from its lower to the upper level and transmitted to comparison device 21, where it is compared with magnitude $L_s$ of hydraulic sensor 23. In comparison device 21 determines the result by using dependence $\Delta L_c = L_s - L_i$. The result of the calculation in comparison device 21 $\Delta L_c$ is transmitted to relay element 22 with logical output and nonlinear static characteristic of the function of $\Delta L_c$, $L = f(\Delta L_c)$. Result $L$ takes discrete values 0 or 1 in cases where $\Delta L_c < \delta$ and $\Delta L_c \geq \delta$. The value $\delta$ is the minimum value of the signal at which relay control element 22 is triggered. The value of $\delta$ is set accordingly to the necessary magnitude of tolerance of the clamping force. This determines the operation of the CM control system in relation to the algorithm for switching on electromagnetic windings 3 and 5 (Fig. 1) of the electric drive CM. The clamping process is finished when the state of $\Delta L_c < \delta$ is reached.

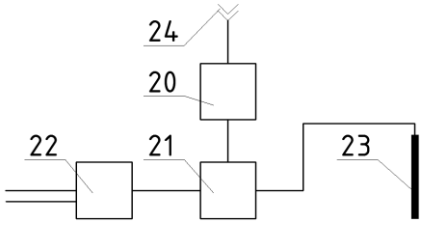



Figure 4– The structure of the control system unit

**Conclusions**

The developed construction of the new CM allows enhancing the characteristics of the clamping process of tools and workpieces in spindle units. In particular, the characteristic features of this design are that there is no energy consumption while the workpiece is retained in the clamped state during machining and the magnitude of the clamping force does not depend on uncontrolled changes in the voltage of a supply network. The new design ensures reliable holding of the workpiece even due to accidental loss of energy supply of CM. Due to the use of several energy converter mechanisms, a nominal amount of clamping force can be reached with small radial dimensions of the mechanism. The kinematical rigidity of transmission of mechanical energy is provided due to the absence of elastic elements and interactions in the closed kinematic chain. The energy supply of the CM is implemented by electromagnetic interaction between the stator and rotor. It gives the advantages such as the possibility to control the CM during spindle rotation. This also helps to reduce influences of

mechanical disturbing effects on the stable operation of spindles. The developed clamping mechanism can be reconfigured by reprogramming according to the different tasks. The developed clamping mechanism can be reconfigured by reprogramming according to the needs of the value of clamping forces.

**References**

1. Alciatore D.G., Histand M.B. (2011). Introduction to Mechatronics and Measurement Systems. (Vol. 4). New York: Avenue of the Americas, NY 10020.

2. Bichop R.H. (2007). Mechatronic System, Sensors, and Actuators: Fundamentals and Modeling. (Vol 2). CRC Press.

3. Yonk Tak Hyan. Know-how feedback based on manufacturing features (STEP-NC Server)//Laboratory for Machine Tools and Production Engineering Aachen University of Technology. Aachen.2003. February 12.P.25.

4. Кузнєцов Ю. М., Придальний Б. І. Приводи затискних механізмів металообробних верстатів: монографія / Луцьк: Вежа-Друк, 2016. 352 с.

5. А. с. 917924 СССР, МПК В 23 В 13/00. Механизм зажима пруткового материала /Ю.Н. Кузнецов, И.И. Булах (СССР). – №2971408/25-08 ; заявл. 08.08.80 ; опубл. 07.04.82, Бюл. № 13.

6. Пат. 95863 Україна, МПК (2015.01) B23B 13/00. Пристрій для затиску пруткового матеріалу / Придальний Б.І, Усін В.І. заявник і власник патенту Луцький національний технічний університет. – №u201407939; заявл. 14.07.2014; опубл. 12.01.2015, Бюл. № 1.

7. Пат. 79495 Україна, МПК (2013.01) B23B 17/00, B23B 19/00, B23Q 3/00. Шпиндельний вузол верстата / Кузнєцов Ю.М., Придальний Б.І., Герра Ж. А. Хамуйєла (AG), Недобой В.А.; заявник і власник патенту Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут". – №u201211892; заявл. 15.10.2012; опубл. 25.04.2013, Бюл. № 8/2013.

**Придальний Б.І.**
Луцький національний технічний університет

**МЕХАТРОННИЙ ЗАТИСКНИЙ МЕХАНІЗМ З ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНИМ ПРИВОДОМ ДЛЯ ШПИНДЕЛЬНИХ ВУЗЛІВ ВЕРСТАТІВ**

*Представлена конструкція затискного механізму для закріплення заготовок та інструментів у шпиндельних вузлах верстатів, який оснащений додатковою підсистемою для забезпечення можливості програмного налаштування необхідної сили затиску. Електронний блок та електромеханічні перетворювачі енергії забезпечують можливість більш легкого пере налаштування механізму шляхом перепрограмування відповідно до заданих потреб обробки. Отримані результати допомагають розширити функціональність затискних механізмів, а отже, функціональність верстатів та їх технологічну гнучкість.*

**Ключові слова***: електрогідравлічний привод, шпиндельний вузол, затискна цанга, передавально-підсилювальні механізми, двигун поступальної дії.*

**Прыдальный Б.И.**
Луцкий национальный технический университет

**МЕХАТРОННЫЙ ЗАЖИМНОЙ МЕХАНИЗМ С ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ ДЛЯ ШПИНДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ СТАНКОВ**

*Представленная конструкция зажимного механизма для закрепления заготовок и инструментов в шпиндельных узлах станков, который оснащен дополнительной подсистемой для обеспечения возможности программного настройки необходимой силы зажима. Электронный блок и электромеханические преобразователи энергии обеспечивают возможность более легкого пере настройки механизма путем перепрограммирования в соответствии с заданными потребностей обработки. Полученные результаты помогают расширить функциональность зажимных механизмов, а следовательно, функциональность станков и их технологическую гибкость.*

**Ключевые слова:** *электрогидравлический привод, шпиндельный узел, зажимная цанга, передаточно-усилительные механизмы, двигатель поступательного действия .*

**© Prydalnyi Borys, Ph. D. in Technical Science, Associate Professor**

УДК 681.121.833
**Ткачук В. В., Середюк О. Є., Боднар Р. Т., Саманів Л. В.**
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

# МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ КОМПОНЕНТНОГО СКЛАДУ ТА ВОЛОГОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ НА ЙОГО ТЕПЛОФІЗИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

*Досліджено вплив вологості природного газу та компонентного складу на його теплофізичні характеристики. Наведено аналіз останніх досліджень якісних характеристик природного газу у сфері термоанемометрії. Розкрито фізичний зміст основних досліджуваних теплофізичних характеристик природного газу – теплопровідність та теплоємність, які є актуальними за умови функціонування термоанемометричного сенсора. На підставі комп'ютерного моделювання встановлено якісний і кількісний зв'язок теплофізичних характеристик природного газу з його компонентним складом і вологістю. Змодельовано вплив зміни вологості та компонентів природного газу(метан, етан, пропан, бутан, пентан, азот, вуглекислий газ) на його теплофізичні характеристики і здійснено кількісний аналіз такого впливу.*

**Ключові слова:** *природний газ, компонентний склад, вологість, теплопровідність, теплоємність, термоанемометричні вимірювання.*

**Вступ та постановка проблеми**. В теперішній час розвитку економіки держави енергоносії займають все-таки рушійну роль в діяльності підприємств, а точність кількісної оцінки енергоносіїв займає важливе місце в питаннях обліку. На сьогодні одним із головних енергоносіїв є природний газ, який і надалі відіграватиме значну роль в енергозабезпеченні української та світової економіки [1]. В комерційних цілях розрахунок природного газу проводиться в об'ємних одиницях, що ставить необхідність вирішення ряду питань щодо достовірності кількісної оцінки доставленого та спожитого газу для суб'єктів комерційного процесу.

Враховуючи фізико-хімічні властивості природного газу як енергоносія, такий фізичний параметр як його об'єм не можна вважати основною одиницею при його обліку без встановлення його якісних характеристик. Відомо [2], що тиск та температура безпосередньо впливають на об'єм виміряного природного газу. Також за різних компонентних складів природний газ буде мати різні якісні та кількісні характеристики, що вже вказує на "двовимірність" оцінювання природного газу в енергетичних одиницях [3].

При вирішенні питання кількісної оцінки спожитої енергії газу досить суттєву відповідь можуть надати термоанемометричні перетворювачі, які наділені високою точністю, швидкодією, широким діапазоном вимірювань та малою інерційністю [4, 5]. Термоанемометричні перетворювачі безпосередньо можуть визначити об'ємну та масову витрату облікованого середовища, адже за різних якісних характеристик природного газу взаємодія давача із середовищем буде різною. В процесах обліку енергоносіїв при застосуванні термоанемометричного методу необхідно враховувати теплофізичні характеристики газового середовища, зокрема теплопровідність та теплоємність.

Таким чином, при термоанемометричних методах обліку природного газу необхідно враховувати окрім фізико-хімічних властивостей газового середовища його теплофізичні характеристики. Тому актуальними є дослідження теплофізичних властивостей природного газу не тільки при витратометрії, але й з наукової точки зору при моделюванні процесів термоанемометрії.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Теоретичні дослідження зміни теплофізичних параметрів природного газу при зміні компонентного складу (межі зміни: метан 89–97 %, етан 0–6%, пропан 0–3 %, азот 0–3%, вуглекислий газ 0–0,8 %) за тисків 0,1–2 МПа і температур 283,15–303,15 К викладені у роботі [6]. Проведені експериментальні дослідження підтвердили вплив неодинакового компонентного складу природного газу на його теплофізичні характеристики та обгрунтували можливість обліку природного газу термоанемометричним методом[7].

Сучасні тенденції розвитку термоанемометрії у сфері обліку природного газу вказують, що за цим методом є майбутнє, однак він потребує подальшого удосконалення з метою підвищення точності і модельного врахування впливових факторів [8]. Це стосується не тільки

© Ткачук В. В., Середюк О. Є., Боднар Р. Т., Саманів Л. В.

апаратурного та конструктивного удосконалення, але і удосконалення математичних моделей, які би враховували зміну різних впливових факторів, які стосуються компонентного складу облікованого середовища. Так ні в одній з відомих нами статей не досліджується вплив вологи на функціонування термоанемометричних сенсорів. Це питання є актуальним, оскільки хроматографічний метод аналізу природного газу передбачає його попереднє осушування[2], а метод змінного перепаду тиску передбачає також облік сухого природного газу з коефіцієнтом відносної вологості не більше 0,1 [9]. Тому невивченим є питання впливу вологості робочого середовища на функціонування термоанемометричних сенсорів.

Перші дослідження цього напрямку викладені в роботі [10], де робочим середовищем виступало повітря. За цих умов було теоретично досліджено вплив вологості повітря на його теплофізичні характеристики при функціонуванні термоанемометричних сенсорів при зміні температури 10–40°С, тиску 0,1МПа та відносної вологості 10–90%. За результатами моделювання встановлено, що при зростанні вологості та температури повітря відбувається збільшення його теплоємності та зменшення теплопровідності. При цьому за вищої температури вологого повітря вплив вологості є більш суттєвий на його теплопровідність та теплоємність.

Наступним напрямком теоретичних досліджень було дослідження зміни теплофізичних параметрів вологого природного газу[11]. Для теоретичних досліджень було вибрано природний газ сталого компонентного складу за масовим вмістом (93,11% – метан, 3,23% – етан, 1,45% – пропан, 0,61% – бутан, 0,12 – пентан, 0,057% – гексан, 1,13% – азот, 0,26% – вуглекислий газ). Вплив вологи природного газу на зміну його теплопровідності та теплоємності проводилося за допомогою комп'ютерного моделювання за зміни температури 0–40°С, абсолютного тиску 0,1МПа та відносної вологості 10–90%. Результати дослідження підтвердили, що волога безпосередньо впливає на зміну теплофізичних характеристик природного газу, що може бути впливовим фактором при термоанемометричних вимірюваннях. Виявлено також, що більш суттєвою є зміна теплофізичних параметрів за більших температур газового середовища.

Таким чином, зазначені наукові дослідження вказують на необхідність дослідження впливу вологи досліджуваного газового середовища на його теплофізичні характеристики при різних концентраціях вуглеводневих та невуглеводневих компонентів природного газу, що є актуальним при здійсненні термоанемометричних вимірювань якісних характеристик, об'єму та енергії природного газу.

Метою роботи є моделювання впливу вологості природного газу на його теплофізичні характеристики за умови зміни якісних характеристик, тобто компонентного складу.

**Виклад основного матеріалу.** Виходячи з кінетичної теорії перенесення тепла у речовині, теплопровідність газу при стандартних значеннях тиску та температури визначається перенесенням кінетичної енергії при броунівському молекулярному русі в досліджуваному середовищі. Коефіцієнт теплопровідності $\lambda$ визнається, як добуток середньої швидкості молекул газу, середньої довжини вільного пробігу молекул, теплоємності газу при сталому тиску за відомого значення густини газу [12]:

$$\lambda = \frac{1}{3}\bar{w}\bar{l}c_p\rho\,, \tag{1}$$

де $\bar{w}$ – середня швидкість переміщення молекул газу; $\bar{l}$ – середня довжина вільного пробігу молекул газу; $c_p$ – теплоємність газу за сталого тиску; $\rho$ – густина газу.

В свою чергу, середня швидкість переміщення молекул газу напряму залежить від температури [12]:

$$\bar{w} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}}\,, \tag{2}$$

де $R$ – універсальна газова стала; $\mu$ – молекулярна маса газу; $T$ – температура.

Звідси є очевидним, що зі зростанням температури коефіцієнт теплопровідності зростає. Однак у зв'язку складності вимірювання параметрів $\bar{w}$, $\bar{l}$ відомими є табличні значення параметрів $\lambda$ та $C_p$ для конкретних газів за їх тиску і температури[13, 14].

Вміст водяної пари в газі характеризується абсолютною та відносною вологістю. Під поняттям абсолютної вологості газу при заданих значеннях тиску та температури розуміється маса водяної пари, що міститься в одиниці об'єму газу. Відносна вологість є відношенням фактичного вмісту водяної пари в одиниці об'єму газу при заданих умовах тиску та

© Ткачук В. В., Середюк О. Є., Боднар Р. Т., Саманів Л. В.

температури до його максимально можливої кількості в тому же об'ємі при певних значеннях тиску і температури[2].

З урахуванням того, що вологий природний газ є сумішшю окремих його вуглеводневих і невуглеводневих компонентів, для розрахунку значень теплофізичних характеристик використовувався метод Кея [15], який передбачає розрахунок параметрів газової суміші на базі сумування характеристик кожного компонента і його молярної концентрації в газовій суміші.

За основу при моделюванні вибрано наступний компонентний склад природного газу за об'ємним вмістом, який відображений в табл. 1.

Таблиця 1

Об'ємний та масовий компонентний склад базового природного газу

| Компонент | Метан | Етан | Пропан | Бутан | Пентан | Гексан | Кисень | Азот | Вугл.газ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Об. Вміст, $C_i$, % | 96,66 | 1,79 | 0,55 | 0,17 | 0,028 | 0,011 | 0,004 | 0,67 | 0,099 |
| Мас.вміст, $X_i$, % | 93,11 | 3,23 | 1,46 | 0,61 | 0,121 | 0,057 | 0,008 | 1,13 | 0,262 |

При цьому масовий вміст компонентів для табл. 1 розраховувася за формулою[2]:

$$X_i = \frac{C_i \cdot M_i \cdot 100}{\sum_{i=1}^{n} C_i \cdot M_i}, \quad (3)$$

де $X_i$ – масова доля компонента *i*, %; $C_i$ – об'ємна(молярна) доля компонента *i*, %; $M_i$ – молярна маса компонента *i*, г/моль; *n* – число компонентів в базовій пробі.

У формулі (3) при розрахунку масової долі у параметрі $C_i$ не враховувалися значення фактора стисливості компонентів. Тому для практичних розрахунків за умов близьких до стандартних можна вважати, що молярна концентрація компоненти практично відповідає об'ємній.

Для моделювання були сформовані такі межі зміни компонентного складу природного газу в об'ємних долях (табл. 2).

Таблиця 2

Межі зміни компонентного складу природного газу

| Компонент | Метан | Етан | Пропан | Бутан | Пентан | Азот | Вугл.газ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Межі зміни, об. вмісту (%) | 87 – 97 | 1 – 11 | 0,1 – 6 | 0,1 – 4 | 0,1 – 4 | 1 – 11 | 1 - 11 |

Моделювання здійснювалося за фіксованих значень тиску 0,1 МПа та температури 20°С.

Спочатку відносно складу базового природного газу за об'ємним вмістом визначалися об'ємні долі кожного компоненту. Після цього за формулою (3) розраховувалися масові долі компоненту та їх співвідношення. Наступним кроком дискретно змінювався об'ємний вміст досліджуваного впливового компоненту, наприклад, метану і пропорційно розраховувалися об'ємні значення інших компонентів з урахуванням співвідношення між складовими, які вказані в табл. 1, щоб забезпечити досягнення загального об'єму суміші до 100%. Після цього знову розраховувалися отримані масові співвідношення компонентів.

Значення теплопровідностей λ та теплоємності $C_p$ кожного компонента визначалися відповідно до довідкових даних[13, 14] за визначених умов моделювання.

Теплопровідність газової суміші $\lambda_{см}$ розраховувалась як сума основних компонентів газової суміші з додаванням вмісту вологи, враховуючи масовий вміст кожної складової газової суміші відповідно до правила Кея[15]:

$$\lambda_{см} = \lambda_1 g_1 + \lambda_2 g_2 + \ldots + \lambda_n g_n + \lambda_\varphi g_\varphi = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i g_i + \lambda_\varphi g_\varphi, \quad (4)$$

де $\lambda_i$ – теплопровідність *i*-го компонента; $g_i$ – масовий вміст *i*-го компонента газової суміші; $\lambda_\varphi$, $g_\varphi$ – теплопровідність та масовий вміст вологи.

Для розрахунку ізобарної теплоємності газової суміші $C_{p.см}$ використаний алгоритм ідентичний як для розраунку теплопровідності, з урахуванням відповідного масового вмісту кожного компонента [15]:

© Ткачук В. В., Середюк О. Є., Боднар Р. Т., Саманів Л. В.

$$C_{p\,см} = C_{p1}g_1 + C_{p2}g_2 + \ldots + C_{pn}g_n + C_{p\varphi}g_\varphi = \sum_{i=1}^{n} C_{pi}g_i + C_{p\varphi}g_\varphi\,, \qquad (5)$$

де $C_{pi}$ – теплоємність *i*-го компонента; $g_i$ – масовий вміст *i*-го компонента газової суміші; $C_{p\varphi}$, $g_\varphi$ – ізобарна теплоємність та масовий вміст вологи.

Розрахунок параметрів $g_i$, $g_\varphi$ проводився за формулами:

$$g_i = \frac{m_i}{\sum_{i=1}^{n} m_i + m_\varphi}\,, \qquad (6)$$

$$g_\varphi = \frac{m_\varphi}{\sum_{i=1}^{n} m_i + m_\varphi}\,, \qquad (7)$$

де $m_i$, $m_\varphi$ – маса *i*-го компонента природного газу і водяної пари у вологому газі відповідно.

Масовий вміст вологи в природному газі, розраховувався за формулою[15]:.

$$\rho_{в.п} = \frac{\varphi \cdot \rho_{в.п.max}}{100}\,, \qquad (8)$$

де φ – відносна вологість природного газу, %; $\rho_{в.п\ max}$ – максимальна густина водяної пари при заданих умовах моделювання, кг/м$^3$; $\rho_{в.п}$ – густина водяної пари при заданих умовах моделювання, кг/м$^3$.

Таким чином, використання алгоритму (3) – (8) дозволяє реалізувати тривимірне моделювання зміни параметрів λ та $C_p$ від вологості φ і кожного окремого впливового параметра (метан, етан, пропан, бутан, пентан, азот, вуглекислий газ).

Результати моделювання подаються графічними ілюстраціями(рис.1 – 7) та отриманими апроксимаційними рівняннями, які подаються далі за текстом.

Моделювання зміни вмісту метану проводилося в межах 87 – 97%, при зміні вологості 10 – 90% за фіксованого значення температури 20°С та тиску 0,1МПа. При цьому зміна теплопровідності за вмісту метану 87% складає 0,24 (мВт/м·К), а теплоємності 0,003(кДж/кг·К). При вмісту метану 97% теплопровідність зменшувалась на 0,28 (мВт/м·К), а теплоємність на 0,005(кДж/кг·К). Це відповідає зміні теплопровідності на 0,78%, теплоємності на 0,14% при 87% метану, а за вмісту метану 97% зміна теплопровідності склала 0,86% та теплоємності – 0,24%.

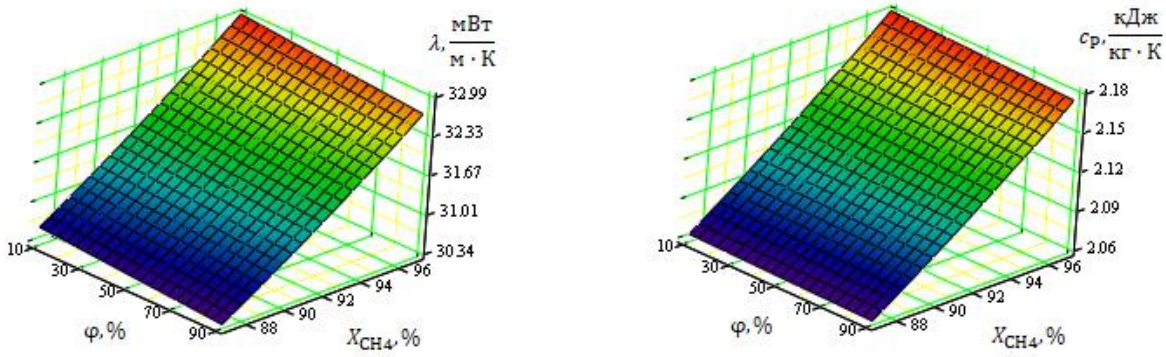



Рис. 1. Графічна ілюстрація зміни теплопровідності(а),
та теплоємності (б) природного газу від відносної вологості *φ* та об'ємного вмісту метану $X_{CH4}$

Результати моделювання дозволили отримати такі апроксимаційні залежності зміни теплопровідності та теплоємності від цих досліджуваних параметрів:

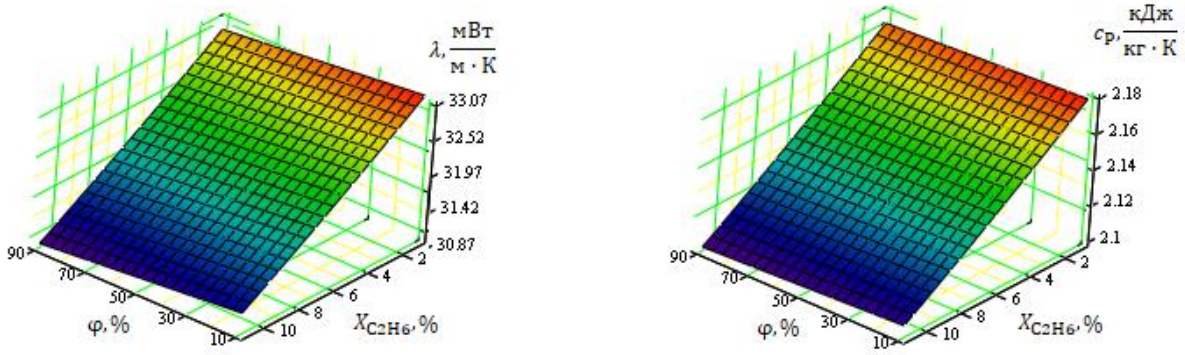
$$\lambda_{CH4} = 9{,}8596 + 0{,}2383 \cdot X_{CH4} - 0{,}0032 \cdot \varphi \qquad (9)$$

$$C_{pCH4} = 1{,}03998 + 0{,}011732 \cdot X_{CH4} - 0{,}00005 \cdot \varphi \qquad (10)$$

де, $\lambda_{CH4}$ – теплопровідність природного газу за зміни вмісту метану; $X_{CH4}$ – вміст метану; φ – відносна вологість природного газу.

Моделювання теплопровідності та теплоємності природного газу за зміни вмісту етану від 1 до 11%, показало при 1% етану зміну теплопровідності від 33,07 до 32,78 (мВт/м·К), теплоємності від 2,182 до 2,177 (кДж/кг·К) та при 11% етану зміна була від 31,12 до 30,87

(мВт/м·К), 2,106 до 2,102 (кДж/кг·К). У відсотках це становить зміну 0,87 % та 0,24 %, 0,8 % та 0,18 %.




а) б)

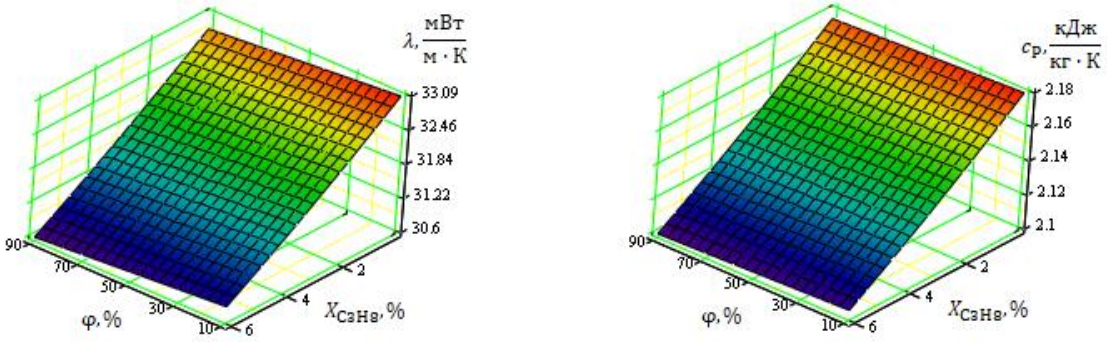
Рис. 2. Графічна ілюстрація зміни теплопровідності(а),
та теплоємності (б) природного газу від відносної вологості $\varphi$ та об'ємного вмісту етану $X_{C2H6}$

За цим моделюванням зміни теплопровідності та теплоємності від вологості та концентрації етану(рис. 2), отримано такі апроксимаційні залежності:

$$\lambda_{C2H6} = 33{,}2167 - 0{,}1914 \cdot X_{C2H6} - 0{,}0033 \cdot \varphi \quad (11)$$

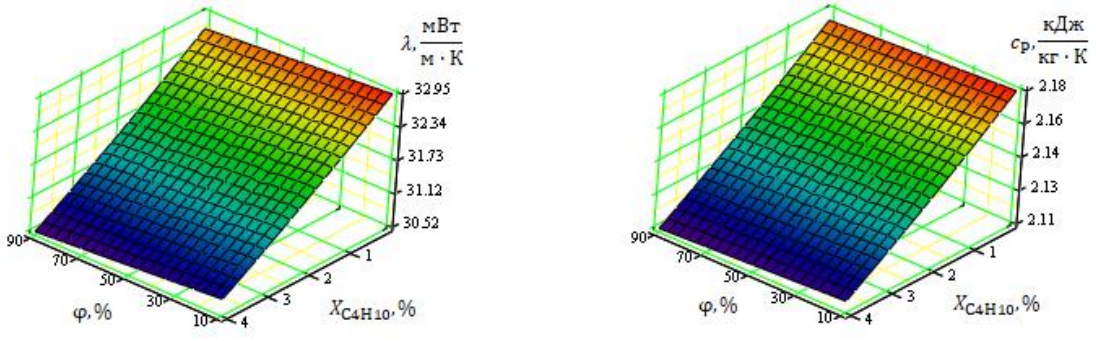
$$C_{pC2H6} = 2{,}187446 - 0{,}007505 \cdot X_{C2H6} - 0{,}000055 \cdot \varphi \quad (12)$$

Результати аналогічних моделювань від решти досліджуваних впливових параметрів подано на рис. (3) – (7), де конкретизовані діапазони зміни досліджуваних параметрів.




а) б)

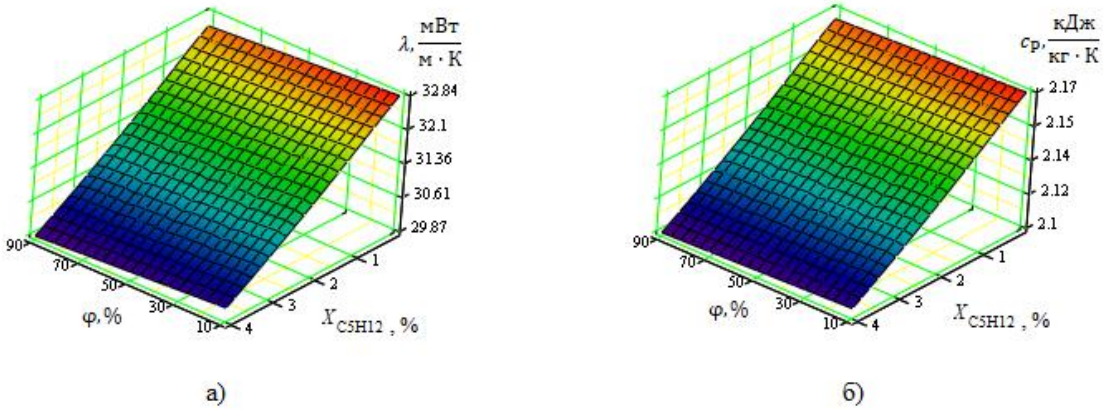
Рис. 3. Графічна ілюстрація зміни теплопровідності(а),
та теплоємності (б) природного газу від відносної вологості $\varphi$ та об'ємного вмісту пропану $X_{C3H8}$




а) б)

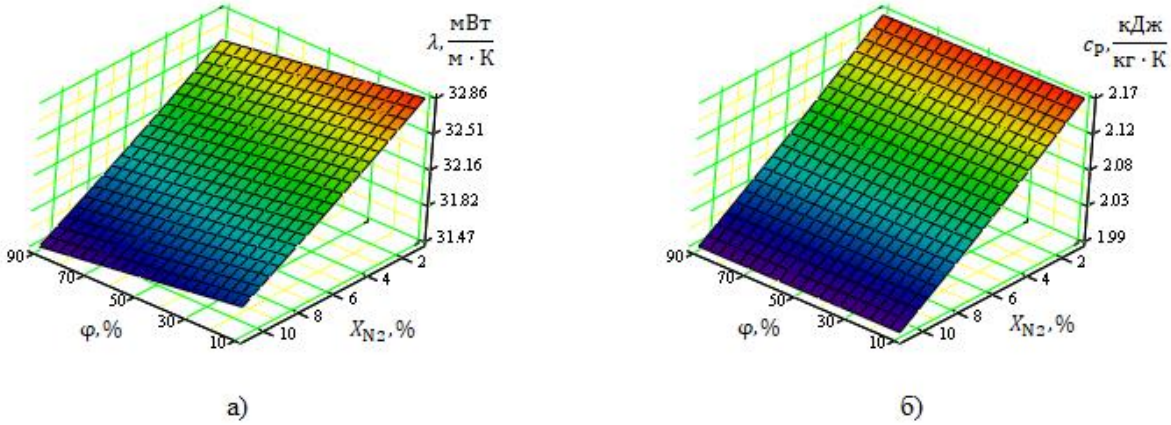
Рис. 4. Графічна ілюстрація зміни теплопровідності(а),
та теплоємності (б) природного газу від відносної вологості $\varphi$ та об'ємного вмісту бутану $X_{C4H10}$

© Ткачук В. В., Середюк О. Є., Боднар Р. Т., Саманів Л. В.



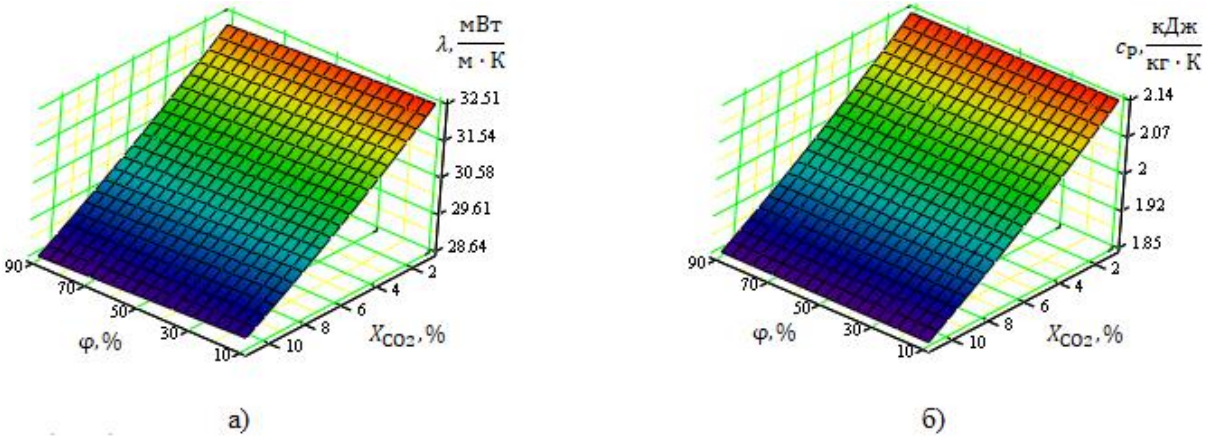

а) б)

Рис. 5. Графічна ілюстрація зміни теплопровідності(а),
та теплоємності (б) природного газу від відносної вологості $\varphi$ та об'ємного вмісту пентану $X_{C5H12}$




а) б)

Рис. 6. Графічна ілюстрація зміни теплопровідності(а),
та теплоємності (б) природного газу від відносної вологості $\varphi$ та об'ємного вмісту азоту $X_{N2}$




а) б)

Рис. 7. Графічна ілюстрація зміни теплопровідності(а),
та теплоємності (б) природного газу від відносної вологості $\varphi$ та вмісту вуглекислого газу $X_{CO2}$

За поточним моделюванням отримано наступні апроксимаційні залежності зміни теплопровідності та теплоємності природного газу від вологості та концентрації окремих досліджуваних параметрів, вказаних індексами при позначенні теплопровідностей λ та теплоємностей $C_p$:

$$\lambda_{C3H8} = 33{,}1153 - 0{,}3772 \cdot X_{C3H8} - 0{,}0033 \cdot \varphi \quad (13)$$

$$C_{pC3H8} = 2{,}182351 - 0{,}012963 \cdot X_{C3H8} - 0{,}000056 \cdot \varphi \quad (14)$$

© Ткачук В. В., Середюк О. Є., Боднар Р. Т., Саманів Л. В.

$$\lambda_{C4H10}=32,9938-0,5563\cdot X_{C4H10}-0,0033\cdot\varphi \quad (15)$$
$$C_{pC4H10}=2,177812-0,015723\cdot X_{C4H10}-0,000057\cdot\varphi \quad (16)$$
$$\lambda_{C5H12}=32,9125-0,7035\cdot X_{C5H12}-0,0032\cdot\varphi \quad (17)$$
$$C_{pC5H12}=2,175605-0,018682\cdot X_{C5H12}-0,000055\cdot\varphi \quad (18)$$
$$\lambda_{N2}=32,9886-0,1121\cdot X_{N2}-0,0034\cdot\varphi \quad (19)$$
$$C_{p\,N2}=2,184794-0,017846\cdot X_{N2}-0,00004\cdot\varphi \quad (20)$$
$$\lambda_{CO2}=32,7991-0,3624\cdot X_{CO2}-0,003\cdot\varphi \quad (21)$$
$$C_{p\,CO2}=2,165218-0,029257\cdot X_{CO2}-0,00002\cdot\varphi \quad (22)$$

Для узагальнення впливу кожного компонента природного газу на зміну теплофізичних властивостей проведені обчислення, які наведені в табл. 3, 4.

Таблиця 3

Зміна теплопровідності природного газу на 1% зміни відповідного компоненту в його складі за різних значень вологості (за об'ємним вмістом компоненту)

| Δλ, мВт/(м · К) | $CH_4$ | $C_2H_6$ | $C_3H_8$ | $C_4H_{10}$ | $C_5H_{12}$ | $N_2$ | $CO_2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Вологість 10% | 0,24071 | 0,19492 | 0,37443 | 0,54739 | 0,68572 | 0,11325 | 0,36642 |
| Вологість 90% | 0,23617 | 0,19125 | 0,36737 | 0,53707 | 0,67278 | 0,11112 | 0,35951 |

Таблиця 4

Зміна теплоємності природного газу на 1% зміни відповідного компоненту в його складі за різних значень вологості (за об'ємним вмістом компоненту)

| $\Delta C_p$,кДж/(кг·К) | $CH_4$ | $C_2H_6$ | $C_3H_8$ | $C_4H_{10}$ | $C_5H_{12}$ | $N_2$ | $CO_2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Вологість 10% | 0,01186 | 0,00764 | 0,01287 | 0,01547 | 0,0182 | 0,01802 | 0,02959 |
| Вологість 90% | 0,01164 | 0,00749 | 0,01263 | 0,01518 | 0,01786 | 0,01768 | 0,02903 |

Результати аналізу таблиць 3, 4 свідчать, що зростання вмісту компонента з більшою молярною масою приводить збільшення параметрів λ та $C_p$. Однак цій закономірності не задовольняє зміна етану, оскільки його вплив є менший від зміни впливу метану. Вплив зміни азоту є найменший серед досліджуваних впливів досліджуваних компонентів. Вплив зміни вуглекислого газу є близький до впливу зміни пропану. Також виявлені загальні закономірності зменшення впливу кожного досліджуваного компонента із зростанням вологості газу. Очевидним є також незначний вплив зміни вологості природного газу на його теплофізичні параметри порівняно із впливом від зміни досліджуваних компонентів природного газу. При цьому ці закономірності якісно є подібними для двох досліджуваних теплофізичних параметрів: теплопровідності і теплоємності. Отримані результати в ході комп'ютерного моделювання визначають необхідність врахування вологості природного газу та його компонентного складу при виконанні термоанемометричних вимірювань

**Висновки.** За використання методів комп'ютерного моделювання досліджено взаємозв'язок якісних характеристик вологості та компонентного складу природного газу з його теплофізичними характеристиками, зокрема теплопровідністю та теплоємністю.

Отримані регресійні залежності впливу відносної вологості та компонентного складу на теплофізичні характеристики природного газу, які вказують на зменшення теплопровідності та теплоємності зі збільшення вуглеводневої групи: етану, пропану, бутану, пентану та невуглеводневої групи – азоту та вуглекислого газу.

Здійснено чисельне моделювання впливу зміни компонентного складу природного газу на його теплофізичні параметри за різних значень його вологості.

Змодельовані залежності встановлюють важливість врахування впливу якісних та теплофізичних характеристик природного газу при його термоанемометричних дослідженнях.

Подальші дослідження будуть спрямовані на визначення впливу тиску і температури природного газу на зміну його теплофізичних властивостей.

**Література:**

1. Прогноз економічного і соціального розвитку України на 2021-2023 роки: Постанова Кабінету Міністрів України від 29.07.2020 № 671. Офіційний вісник України. 2020. 113 с.

2. Облік природного газу: довідник / М. П. Андріїшин, О. Є. Середюк, С. А. Чеховський [та ін..] / за ред. С.А.Чеховського. Івано-Франківськ: ПП «Сімик», 2008. 180 с.

**© Ткачук В. В., Середюк О. Є., Боднар Р. Т., Саманів Л. В.**

3. ДСТУ ISO 15112:2009. Природний газ. Визначення енергії. [Чинний від 2011-01-01]. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2010. 48 с. (Національний стандарт).

4. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества веществ: справочник. Кн. 2 СПб.: Политехника, 2004. 412 с.

5. Малісевич В. В. Контроль енергетичної цінності природного газу із застосуванням термоанемометричних перетворювачів : автореф. дис. ... канд. тех. наук. : 05.11.13. Івано-Франківськ, 2015. 20 с.

6. Середюк О. Є., Малісевич В. В. Теоретичні засади застосування напірного витратоміра для визначення енергетичної цінності природного газ. Метрологія та прилади. 2014. № 5. С. 38–47.

7. Serediuk O., Malisevych V. , Warsza Z. L. Termoanemometryczna metoda pomiaru wartości energetycznej gazu ziemnego. Przemysł chemiczny. 2017. V. 96. No. 11. P.2243–2246.

8. Середюк О. Є, Криницький О. С., Ткачук В. В. Сучасні тенденції розвитку термоанемометрії у сфері обліку природного газу. Український метрологічний журнал. 2020. № 3А. С. 51–55.

9. ДСТУ ГОСТ 8.585.2:2009 Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини й газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Частина 2. Діафрагми. Технічні вимоги: [Чинний від 2010-04-01]. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України, 2009. 92 с. (державний стандарт України).

10. Середюк О. Є., Ткачук В. В., Саманів Л. В. Дослідження впливу вологості повітря на теплофізичні характеристики при функціонуванні термоанемометричних сенсорів. Приладобудування та метрологія: сучасні проблеми, тенденції розвитку : збірник тез IV Всеукр. наук.-практ. конф. (29-30 жовтня 2020 р.) : Луцьк : Луцький НТУ, 2020. С. 82–84.

11. Середюк О. Є., Ткачук В. В. Моделювання впливу вологи природного газу при термоанемометричних вимірюваннях. Прикладні науково-технічні дослідження : матеріали V міжнар. наук.-прак. конф., 5-7 квіт. 2021 р. Академія технічних наук України. Івано-Франківськ : Видавець Кушнір Г. М., 2021. С. 222–224.

12. Коротких А. Г. Теплопроводность материалов: учебное пособие. Томск: Томский политехнический университет, 2011. 97 с.

13. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 720 с.

14. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов / Н.Б. Варгафтик,Л.П. Филиппов, А.А. Тарзиманов [и др.]. М.: Энергоатомиздат, 1990. 352 с.

15. Измерение и учет расхода газа: справ. пособие / В. А. Динков, З. Т. Галиуллин, А. П. Подкопаев, В. С. Кондратьев. М. : Недра, 1979. 304 с.

**Tkachuk V. V., Serediuk O. E., Bodnar R. T., Samaniv L. V.**
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

## MODELING OF INFLUENCE OF COMPONENT COMPOSITION AND HUMIDITY OF NATURAL GAS ON ITS THERMOPHYSYCAL CHARACTERISTICS

*The influence of natural gas humidity and component composition on its thermophysical characteristics has been studied. The analysis of the last researches of qualitative characteristics of natural gas in the field of thermoanemometry was given. The physical meaning of the main studied thermophysical characteristics of natural gas - thermal conductivity and heat capacity was explored in the operation of the thermoanemometric sensor. Based on computer simulations, a qualitative and quantitative relationship between the thermophysical characteristics of natural gas and its component composition and humidity has been established. The influence of changes in humidity and composition of natural gas (methane, ethane, propane, butane, pentane, nitrogen, carbon dioxide) on its thermophysical characteristics was modeled and the quantitative analysis of such influence was carried out.*

**Key words**: *natural gas, component composition, humidity, thermal conductivity, heat capacity, thermoanemometric measurements.*

**Ткачук В. В., Середюк О. Е., Боднар Р. Т., Саманив Л. В.**
Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа

**© Ткачук В. В., Середюк О. Є., Боднар Р. Т., Саманів Л. В.**

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА И ВЛАЖНОСТИ ПРИРОДНОГО ГАЗА НА ЕГО ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

*Исследовано влияние влажности природного газа и компонентного состава на его теплофизические характеристики. Проведен анализ последних исследований качественных характеристик природного газа в сфере термоанемометрии. Раскрыто физический смысл основных исследуемых теплофизических характеристик природного газа - теплопроводность и теплоемкость, которые актуальны при условии функционирования термоанемометрического сенсора. На основании компьютерного моделирования установлено качественная и количественная связь теплофизических характеристик природного газа с его компонентным составом и влажностью. Смоделировано влияние изменения влажности и компонентов природного газа (метан, этан, пропан, бутан, пентан, азот, углекислый газ) на его теплофизические характеристики и осуществлен количественный анализ такого воздействия.*

**Ключевые слова**: *природный газ, компонентный состав, влажность, теплопроводность, теплоемкость, термоанемометрические измерения.*

**© Ткачук В. В., Середюк О. Є., Боднар Р. Т., Саманів Л. В.**

УДК 681.2.08
**Чуйко М.М., Витвицька Л.А.**
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

# ЕКСПРЕС-МЕТОД КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН ДЛЯ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ НАФТОГАЗОВИДОБУТКУ

*Проаналізовано процес витіснення нафтового флюїду з пор нафтогазоносних порід, встановлено параметри, за якими визначається якість поверхнево-активних речовин (ПАР), використовуваних для інтенсифікації нафтовіддачі. Обгрунтовано необхідність здійснювати підбір конкретного виду ПАР для конкретних порід нафтогазоносних пластів. Запропоновано метод експрес-контролю якості ПАР та розроблено конструкцію пристрою для реалізації методу.*

**Ключові слова:** *поверхнево-активні речовини, нафтогазоносні породи, адгезійно-когезійна взаємодія, змочування, витіснення рідини, пори*

**Вступ та постановка проблеми.** Для інтенсифікації нафтогазовіддачі в процесі нафтогазовидобування вирішальну роль відіграють поверхнево-активні речовини (надалі ПАР). Ця роль полягає у покращенні змочування пластовою рідиною (флюїдом) внутрішніх поверхонь пор нафтогазоносних порід, що призводить до підвищення ступеня витіснення нафтопродукта до гирла свердловини. В силу існуючої значної кількості видів ПАР, виготовлених на основі різноманітних хімічних елементів та різної концентрації складників, а також різноманітних порід нафтогазоносних пластів виникає необхідність встановлення відповідності конкретних ПАР для конкретних порід. Тому контроль поверхневих властивостей ПАР при встановленні доцільності їх вибору є актуальною задачею в нафтогазовидобуванні.

**Мета роботи.** Ступінь змочування рідиною поверхні твердого тіла визначається за крайовим кутом змочування, який залежить від поверхневих натягів на границях розділу всіх середовищ, які беруть участь у процесі витіснення нафтопродукту: рідкого, твердого та газоподібного [1]. Зниження значення ККЗ призводить до швидшого руху рідини всередині пор, а значить, і до інтенсивнішої нафтовіддачі. Тому якість ПАР і визначається саме за зменшенням поверхневого натягу рідини, тобто за зниженням значення крайового кута змочування, що і приводить до збільшення нафтовіддачі. Однак процес інтенсифікації, тобто відтікання нафти з пор породи залежить також і від в'язкості рідини, від шорсткості внутрішніх поверхонь пор, їх щільності та ступеня накладання пор між собою. Саме тому ставиться задача розроблення методу для проведення комплексного експрес-контролю якості ПАР, використовуваних для інтенсифікації нафто газовидобутку з конкретно взятих пластів порід.

**Результати роботи.** При видаленні рідини з твердої поверхні можливий або адгезійний відрив по межі рідина - тверде тіло, або когезійний відрив, коли порушується межа рідина - рідина. В деяких випадках має місце адгезійно-когезійний відрив. Під адгезією рідини мають на увазі взаємодію рідкої і твердої фаз на межі розділу цих фаз. Величину адгезійної взаємодії можна визначити в процесі видалення рідині з поверхні твердого тіла.

Адгезійна взаємодія між рідкою і твердою фазами розповсюджується на невелику відстань в глиб рідини. Ця відстань вимірюється розмірами молекул або дещо більше. У міру видалення шару рідини від поверхні твердого тіла адгезійна взаємодія зменшується, поступаючись місцем когезійній. Когезія рідини – це взаємодія між молекулами (атомами або іонами) в об'ємі рідкої фази.

Рідина володіє мінімальною зсувною міцністю. Тому величина адгезії і когезії при видаленні рідини може бути визначена лише для граничного шару рідини. У практиці можуть бути реалізовані два випадки взаємодії рідини з твердим тілом: адгезія обмеженого об'єму рідини, тобто адгезія краплі, і адгезія великої кількості рідини [2].

У разі контакту великої кількості рідини з твердою поверхнею робота адгезії вимірюється з розрахунку на одиницю площі контакту рідина - тверде тіло. Робота, яка визначає взаємодію рідини з твердою поверхнею і необхідна для роз'єднання контактуючих тіл, дорівнює роботі адгезії $W_a$, помноженої на площу зіткнення рідини з твердим тілом:

$$W = W_a S . \qquad (1)$$

© Чуйко М.М. к.т.н., Витвицька Л.А., к.т.н., доц.

У разі адгезії краплі під величиною $S$ слід мати на увазі площу контакту краплі з поверхнею. Таким чином, для визначення роботи, що виникає при контакті рідини з твердим тілом, необхідно знати площу контакту її з поверхнею. Ця площа визначається здатністю рідини змочувати тверді поверхні.

Адгезія і змочування - це дві сторони одного і того ж явища, що виникає при контакті рідини з твердою поверхнею. Адгезія обумовлює взаємодію між твердим тілом і рідиною, що знаходиться у контакті з ним, а змочування - це явище, яке має місце в результаті цієї взаємодії.

Видалення рідини з поверхні не можна здійснити тими методами, які застосовуються у разі адгезії частинок, тобто шляхом прикладання зовнішньої сили, що перевищує адгезійну взаємодію. Під дією зовнішньої відриваючої сили (наприклад, відцентровою) відбувається деформація краплі і зміна площі її контакту з поверхнею. У зв'язку з цим оцінка величини адгезії рідини по силі, як це має місце у разі адгезії частинок, не придатна. Тому адгезія рідини оцінюється роботою $W_a$, яку треба витратити для відриву рідині від твердої поверхні, т.б. для відновлення початкового стану контактуючих тіл.

Для оцінки адгезійної взаємодії застосовують і інші показники. Окрім крайового кута змочування $\theta$ піддається експериментальному визначенню поверхневий натяг рідини на границі її розділу з газовим середовищем $\sigma_{рг}$. У зв'язку з цим використовують добуток $\sigma_{рг}$ на $cos\theta$, який називають енергією змочування, або адгезійною напругою:

$$W_e = \sigma_{рг} \cdot cos\theta. \qquad (2)$$

Адгезійна напруга на гідрофільній поверхні сприяє розтіканню краплі, а на гідрофобній – перешкоджає розтіканню.

При контакті рідини з твердою поверхнею вільна поверхнева енергія рівна поверхневому натягу на границі розділу рідина - тверде тіло $\gamma_{рт}$, а після роз'єднання тіл вона стає рівною сумі поверхневих натягів на границях розділу рідина - газ та тверде тіло - газ $\sigma_{рг} + \sigma_{тг}$. Різниця між цими величинами і є робота адгезії.

$$W_a = \sigma_{рг} + \sigma_{тг} - \gamma_{рт}. \qquad (3)$$

З урахуванням рівняння Юнга [3] залежність (3), яка представляє собою роботу адгезії, приведену до одиниці площі, можна записати таким чином:

$$W_a = \sigma_{рг} \cdot (1 + cos\theta). \qquad (4)$$

Як випливає з рис. 1, робота адгезії зменшується із збільшенням крайового кута. Подібна закономірність виявлена у разі змочування водою льоду, а також при змочуванні водою різних поверхонь. Так, при збільшенні крайового кута на полімерних матеріалах від 0 до 108° робота адгезії зменшується від 20 до 1,5 кгс/см$^2$.

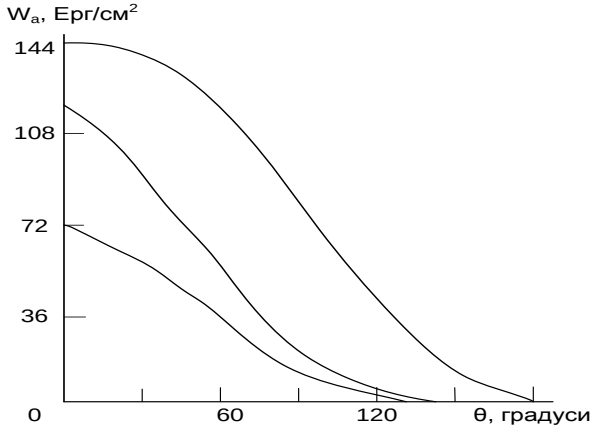



Рис. 1. Залежність між роботою адгезії і крайовим кутом змочування

Часто роботу адгезії зіставляють з роботою когезії. Робота когезії дорівнює тій роботі, яку треба прикласти, щоб подолати взаємодію між собою молекул рідини. При цьому утворюються дві поверхні розділу фаз рідина - газ. Тому робота когезії дорівнює подвоєному значенню вільної поверхневої енергії (поверхневого натягу) рідких фаз, що утворилися, тобто:

$$W_к = 2\sigma_{рг}. \qquad (5)$$

© Чуйко М.М. к.т.н., Витвицька Л.А., к.т.н., доц.

При визначенні роботи, яку необхідно витратити для видалення рідині, слід роботу адгезії помножити на площу контакту рідини з твердою поверхнею.

Можливий інший вираз адгезії, коли робота адгезії відноситься до одиниці поверхні сферичної краплі, яка стикається з газовим середовищем. Тоді роботу $W$, що витрачається для видалення краплі, слід розділити на площу контакту $S'$ з газовим (а не твердим) середовищем.

Також роботу адгезії можна визначати за правилом Антонова [4], яке формулюється таким чином: якщо рідини обмежено розчинені одна в одній, то поверхневий натяг на границі рідина – рідина наближено рівний різниці поверхневого натягу взаємно насичених рідин на межі цих рідин з повітрям. Хоча це правило виведене для рідин, але його можна застосовувати для випадку адгезії рідини на твердій поверхні при повному її змочуванні. Щодо адгезії рідини на твердій поверхні правило Антонова можна представити в наступному вигляді:

$$\gamma_{рт} = \sigma_{рг} - \sigma_{тг}\ , \qquad (6)$$

тобто поверхневий натяг на межі рідини з твердим тілом рівний по абсолютній величині різниці поверхневих натягів рідкої і твердої фаз на межі з газовим середовищем.

У зв'язку з тим, що при розтіканні краплі поверхня розділу рідина - газ змінюється значно менше, ніж поверхня розділу рідина - тверде тіло, можна вважати, що робота адгезії при розтіканні краплі є повнішою характеристикою роботи адгезії при розтіканні більшої кількості рідини. Проте при вирішенні задачі вибору виду ПАР для інтенсифікації нафтовіддачі визначення роботи адгезії при відриві з поверхні пор однієї краплі є більш складною задачею і при цьому не відтворюються процеси витіснення нафтопродуктів у пластових умовах .

Тому пропонується метод комплексного контролю якості ПАР, який полягає у визначенні адгезійно-когезійної роботи шляхом визначення швидкості відтікання рідини із зразка породи. Дана фізична величина залежить від декількох величин: змочування рідиною твердого тіла, поверхневих натягів рідини, твердого тіла, в’язкості рідини, а також від шорсткості поверхні твердого тіла. Оскільки нафтогазоносні породи відрізняються за своєю структурою, розміром пор та ступенем змочування флюїдом стінок пор, який залежить від складу породи, розмірів пор, щільності їх розташування та пластового тиску і температури, виникає необхідність контролю якості ПАР і його вибору для нафтогазоносного пласта конкретної породи. За даним методом здійснюється комплексна оцінка ПАР на п’ятьох зразках однакових розмірів однієї і тієї ж породи. Зразки породи висотою 10 мм отримуються шляхом розрізання керна досліджуваної породи.

Контроль швидкості відтікання здійснюється шляхом неперервної реєстрації зміни об’єму досліджуваної рідини, яка відтікає з поверхні нахиленого зразка і потрапляє у оптично прозору мірну ємність.

На рисунку 2 подана функціональна схема пристрою, за допомогою якого реалізується запропонований метод.

Пристрій складається з трьох основних вузлів різного функціонального призначення. Вузол 1 (електромеханічний блок) здійснює прецизійне переміщення поршня дозатора для нанесення досліджуваної ПАР на зразок породи. Вузол 2 (вимірювальний блок) призначений для вимірювання об’єму рідини, яка стікає із зразка у мірну ємність. У вузлі 3 (блок оброблення та керування) здійснюється реєстрація зміни об’єму ПАР і порівняння часових кривих різних рідин, а також керування процесом роботи дозатора та всього пристрою.

Прецизійне переміщення дозатора Д (шприца) здійснюється за допомогою чотириобмоткового крокового двигуна КД, вал якого з’єднаний з передавальним механізмом ПМ. Обертовий момент з валу двигуна через муфтове з'єднання типу "квадрат" передається на муфту гвинтового з'єднання, де перетворюється в поступальний рух гвинта з напівсферичним наконечником, який кінематично зв’язує гвинт із підпружиненим штовхачем, який зв’язаний із поршнем дозатора. Таким чином ПМ перетворює обертовий рух валу в поступальний рух поршня дозатора. При русі поршня вниз крапля ПАР видавлюється з голки дозатора, при цьому крапельно наноситься досліджувана рідина на пористу поверхню керна. Часовий інтервал між двома видавлюваннями краплі складає час, необхідний для адсорбції рідини пористим тілом (3 хв), вимірювання кількості рідини, котра натекла у колбу-мірник М і подачі серії імпульсів для наступного кроку валу двигуна. Вмикання, реверс чи зупинка двигуна керується персональним комп’ютером ПК через блок управління двигуном БУД почерговою подачею на його обмотки імпульсів напруги 5В, силою струму 1А і довжиною близько 10 мс.

© Чуйко М.М. к.т.н., Витвицька Л.А., к.т.н., доц.

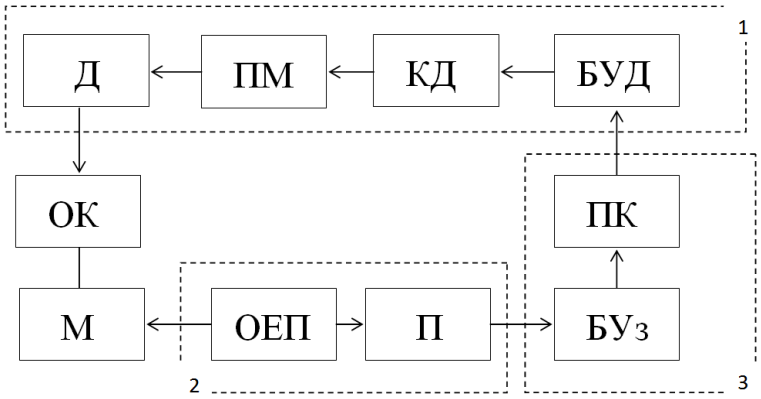



Рис. 2 . Функціональна блок-схема розробленого пристрою

Застосований в пристрої кроковий двигун при подачі одного імпульса на відповідну обмотку дає можливість отримати мінімальний кут обертання на його валу рівний 108 кутових хвилин. Використання крокового двигуна дає можливість здійснювати переміщення поршня з дискретністю 0,5/256, оскільки один повний оберт валу крокового двигуна, який здійснюється при подачі 256 імпульсів на його обмотку збудження, відповідає переміщенню поршня на 0,5 мм. Тому дозований мінімальний об'єм краплі рівний:

$$V = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{0.5}{256} = \frac{3{,}14 \cdot 6^2}{4} \cdot \frac{0.5}{256} = 0.055\ мм^3 \qquad (6)$$

де $D$ — внутрішній діаметр корпусу шприца.

Об'єкт контролю ОК, тобто зразок породи, отриманий з керна, встановлюється на нахилену під кутом 15° основу, розташовану на столі. У нижньому кінці стола розміщений отвір, через який натікає у скляну колбу-мірник М рідина, що пройшла через пори досліджуваного зразка. Стіл і колба розташовані на платформі. Закріплення основи і стола на платформі здійснюється через різьбові з'єднання, що дає можливість регулювати за допомогою нівеліра розташування основи на столі під необхідним кутом для усунення похибки, викликаної невідповідністю нахилу площини зразка, при цьому колба розташовується чітко горизонтально.

Кількість рідини у колбі визначається опто-електронним перетворювачем ОЕП сигнал з якого підсилюється підсилювачем П і через блок узгодження БУз подається на ПК для реєстрації та порівняння з часовими залежностями зміни об'єму рідини у колбі при дослідженні інших зразків та інших ПАР. Через клавіатуру ПК вводяться команди про початок і кінець вимірювання, а також номер зразка та вид ПАР. В ПК формується висновок про якість ПАР стосовно досліджуваного зразка породи, отриманого з керна, Чим вища швидкість натікання розчину ПАР у мірник, тобто чим більший кут нахилу кривої зміни в часі кількості рідини у мірнику, що відповідає кращому змочуванню ПАР стінок пор породи, тим інтенсивнішим буде рух флюїду і краща нафтовіддача пласта.

**Висновки**

1. На основі аналізу процесу інтенсифікації витіснення флюїду з пор нафтогазоносної породи за допомогою поверхнево-активних речовин запропоновано проводити експрес-контроль процесу витіснення на основі вимірювання динаміки витіснення ПАР з пор досліджуваного зразка породи. порівнювати динамічні залежності для різних ПАР і визначати доцільність вибору конкретного виду ПАР для конкретної породи

2. Розроблено конструкцію пристрою, який дозволяє здійснювати вибір найбільш оптимального типу та концентрації розчину ПАР для витіснення ним нафтового флюїду з пор породи.

**Література**

1. Becky L. and Abraham M. The exponential power law: partial wetting kinetics and dynamic contact angles. Colloid Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects. 2014. Vol. 250. Pp. 409–414.

2. Neumann A.W. Applied surface thermodynamics. – 2nd ed. / A.W. Neumann, Robert David, Yi Zuo. – N.Y.: CRC Press Taylor & Francis Group, 2011. – 768 p.

3. Зенгнил Э. Физика поверхности /Э. Зенгнил – М.: Мир., 1990. – 536 с.

© Чуйко М.М. к.т.н., Витвицька Л.А., к.т.н., доц.

4. Киселев В.Ф. Основи физики поверхности твердого тела / В.Ф. Киселев, С.Н. Козлов, А.В. Зотеев – М.: Изд-во Моск. ун-та. – Физфак МГУ, 1999. – 284 с.

**Chuyko M. M, Vytvytska L.A.**
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

**EXPRESS METHOD OF SURFACTANTS QUALITY CONTROL FOR INTENSIFICATION OF OIL AND GAS PRODUCTION**

*The process of displacement of oil fluid from the pores of oil and gas rocks is analyzed, the parameters for determining the quality of surfactants used to intensify oil recovery are established. The necessity to select a specific type of surfactant for specific rocks of oil and gas formations is substantiated. The method of express quality control of surfactants is offered and the design of the device for realization of a method is developed*

**Key words**: *surfactants, oil and gas rocks, adhesive-cohesive interaction, wetting, liquid displacement, pores*

**Чуйко М.М., Витвицкая Л.А**.
Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа

**ЭКСПРЕСС-МЕТОД КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ НЕФТЕГАЗОДОБЫЧИ**

Проанализированы процессы вытеснения нефтяного флюида из пор нефтегазоносных пород, установлено параметры, по которым определяется качество поверхностно-активных веществ, используемых для интенсификации нефтеотдачи. Обоснована необходимость осуществлять подбор конкретного вида ПАР для конкретных пород нефтегазоносных пластов. Предложен метод экспресс-контроля качества ПАР и разработана конструкция устройства для реализации метода

**Ключевые слова**: поверхностно-активные вещества, нефтегазоносные породы, адгезийно- когезийное взаимодействие, смачивание, вытеснение жидкости, поры

© Чуйко М.М. к.т.н., Витвицька Л.А., к.т.н., доц.

УДК 621.18

**Шинкарук Х.М.,Чеховський С.А., Піндус Н.М., Романів В.М.**
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

# ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕРМОКАТАЛІТИЧНОГО МЕТОДУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОТИ ЗГОРЯННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

*Теоретично обґрунтовано можливість застосування термохімічного детектора для визначення теплоти згоряння природного газу. Встановлено, що ступінь згоряння горючих газів в термохімічних газоаналізаторах, заснованих на вимірі температури продуктів згоряння залежить, від об'єму і типу каталізатора, швидкості потоку аналізованого газу і концентрації в ньому горючих газів, а також від температури, що визначає необхідність для забезпечення більшою мірою згоряння горючих речовин підбору товщини шару каталізатора, його активності, температури і визначення допустимих концентрацій компонентів в газовому потоці. Використання імпульсного режиму роботи в газоаналізаторах з термокаталітичним перетворювачем дозволить забезпечити сталість об'ємної витрати аналізованого газу в детектор, що є вирішальним фактором забезпечення точності вимірювання теплового ефекту каталітичного згоряння; здійснювати процес каталітичного згоряння при малих концентраціях горючих компонентів в потоці газу-носія (повітря) за рахунок підбору об'єму проби, що вводиться в аналізатор, що може забезпечити стабільність властивостей каталізатора протягом тривалого часу.*

**Ключові слова:** *природний газ, термокаталітичний метод, якість природного газу, теплотворна здатність природного газу.*

**Вступ та постановка задачі:** Враховуючи динаміку зростання ціни на природній газ актуальним є питання підвищення точності його обліку з врахуванням якісних характеристик газу. Визначення якості природного газу, як енергетичного ресурсу для України є стратегічно важливим аспектом оскільки запаси газу є обмежені. Нами в [1] розглянуто принцип роботи та особливості функціонування термокаталітичних давачів, а також показана принципова можливість їх використання для оцінки якості природного газу. Але повне теоретичне обґрунтування такої можливості практично відсутнє. Тому актуальним завдання є вдосконалення існуючих та розроблення нових підходів для оцінки якісних характеристик природного газу на основі теоретичних досліджень таких підходів.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій:** Основним якісним показником природного газу, що визначає його енергетичну цінність (як палива) є теплотворна здатність газу або теплота згоряння. В Україні чинним стандартом встановлено вимоги до якості природного газу, що подається споживачам, згідно з якими мінімальне значення теплоти згоряння 31,8 МДж/м$^3$ (7600 ккал/м$^3$) при стандартних умовах, які встановлено [2].

Як відомо, теплоту згоряння природного газу визначають властивостями окремих горючих та негорючих газів, його складників та домішок. На сьогоднішній день для визначення теплоти згоряння природного газу на практиці застосовують два основних методи [3,4]:

- прямий, з застосування калориметрів для безпосереднього вимірювання теплової енергії газу, яка виділяється внаслідок його спалювання;
- розрахунковий що базується на використанні даних про компонентний склад природного газу, отриманих за допомогою хроматографічного аналізу.

Також останнім часом багато робіт присвячено розробленню кореляційних методів визначення теплоти згоряння природного газу . Даний підхід дозволяє опосередковано визначати теплоту згоряння природного газу вимірюючи певні фізико-хімічні властивості газової проби за встановленими кореляційними залежностями між параметрами на основі теоретичних та експериментальних досліджень.

Теоретичні дослідження методів та приладів визначення та контролю теплотворної здатності природного газу проведені в [5], дозволяють зробити висновок, що на даний час відсутні прості за конструкцією та доступні для побутового споживача прилади, що серійно випускаються. Тому актуальним завданням є вирішення проблеми оперативного контролю якості природного газу, шляхом наукового обґрунтування, розроблення і вдосконалення засобів, які забезпечують можливість опосередкованого обліку енергетичної цінності природного газу що відповідатимуть світовим тенденціям обліку енергоресурсів.

**Виклад основного матеріалу дослідження:**

Принцип дії термохімічних газоаналізаторів полягає в каталітичному спалюванні горючої речовини на поверхні каталітично активного терморезистора, нагрітого до температури 300-700 °С,

**© Шинкарук Х.М., аспірант, Чеховський С.А., проф., Піндус Н.М., доц., Романів В.М.**

при якому виділяється певна кількість теплоти, що змінює електричний опір терморезистора. Зазвичай, каталітично активний терморезистор являє собою нагріту електричним струмом платинову спіраль (дротину) діаметром 0,03 - 0,08 мм.

Температура *t* каталітично активного платинового терморезистора описується виразом [6]:

$$t = t_c + \frac{I^2 R_0(1+\beta t_c) + kQC}{\alpha F - IR_0\beta} \quad , \qquad (1)$$

де $t_c$ – температура середовища, що оточує терморезистор; I – струм, що протікає через терморезистор; $R_0$ – опір терморезистора; $\beta$ – температурний коефіцієнт опору; Q – тепловий ефект реакції каталітичного згоряння; F – площа поверхні терморезистора; $\alpha$ – коефіцієнт тепловіддачі терморезистора; C – об'ємна концентрація вимірюваної горючої речовини.

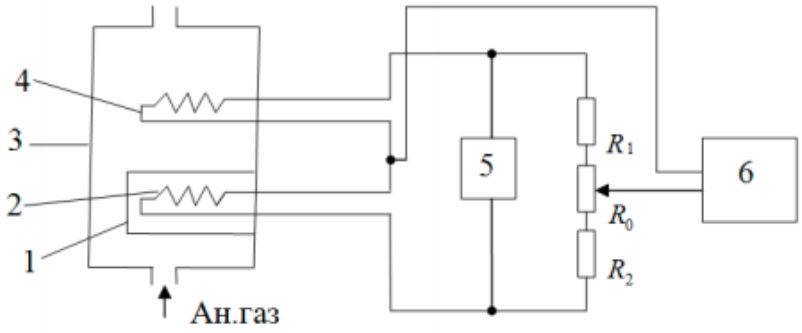



Рисунок 1 – Схема включення однокамерного газоаналізатора з каталітично активним терморезистором

У однокамерному термохімічному газоаналізаторі камера 1 порівняльного терморезистора 2 розміщена в проточній камері 3, в якій розміщений вимірювальний каталітично активний терморезистор 4. Обидва терморезистори включені в схему неврівноваженого електричного моста, який також містить два постійних R1 і R2 і змінний R0 манганінові терморезистори. Живлення моста здійснюється від стабілізованого джерела напруги 5, а розбаланс моста, що має інформацію про об'ємну концентрацію вимірювального компонента, визначається потенціометром або вольтметром, шкала якого може градуюватися в об'ємних концентраціях досліджуваного компонента.

В схемі (рисунок 1) терморезистори включені в неврівноважений міст з джерелом живлення 5. Для вимірювання розбалансу моста використовується автоматичний потенціометр або комп'ютер, забезпечений аналого-цифровим перетворювачем. Вихідний сигнал *U* розглянутого термохімічного газоаналізатора, описується виразом [7]:

$$U = k\varphi Q_H \alpha \quad , \qquad (2)$$

де k – постійний для даного газоаналізатора коефіцієнт; $\varphi$ – коефіцієнт, що характеризує повноту згоряння і залежить від природи аналізованого речовини; $Q_H$ – нижча об'ємна теплота згоряння визначаючої речовини; $\alpha$ – об'ємна концентрація досліджуваної речовини.

Як видно з виразу (2), вихідний сигнал термохімічного газоаналізатора залежить за інших рівних умовах від нижчої об'ємної теплоти згорання досліджуваного горючого компоненту, що міститься в уже згадуваному газі. Крім цього, він залежить від коефіцієнта $\varphi$, який різний для різних горючих речовин.

Для кожного горючого компонента є індивідуальний за значенням коефіцієнт $\varphi$ , який характеризує повноту згоряння і залежить від природи аналізованого компонента.

У загальному випадку хімічна реакція згоряння вуглеводнів має вид:

$$C_m H_n + (m + \frac{n}{4})O_2 = mCO_2 + \frac{n}{2}H_2O \quad , \qquad (3)$$

де *m* - число атомів вуглецю в молекулі; *n* - число атомів водню в молекулі.

Хімічна реакція згоряння метану відповідно до (2.1) має вигляд:

$$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O \qquad (4)$$

Забезпечення повного згоряння вуглеводню в термохімічному газоаналізаторі відповідає рівності коефіцієнта $\varphi$ одиниці. В цьому випадку вираз (2) перетвориться до виду:

$$U = K\alpha Q \quad (5)$$

З виразу (5) випливає, що при $\varphi = 1$ за допомогою термохімічного газоаналізатора при постійному значенні $\alpha$ можна, можливо вимірювати нижчу об'ємну питому теплоту згоряння газу. Це визначає можливість використання такого газоаналізатора як газового калориметра. У разі постійності $Q$ такий газоаналізатор може використовуватися для вимірювання об'ємної концентрації будь - якого вуглеводню або в якості детектора для газової хроматографії. При цьому, так як сигнал детектора в цьому випадку пов'язаний з фізичною величиною нижчою об'ємною теплотою згоряння, то це дозволяє спростити калібрування газоаналізатора об'ємної концентрації або інтерпретацію результатів хроматографічного аналізу.

В цілому слід підкреслити, що ступінь згоряння горючих газів в термохімічних газоаналізаторах, заснованих на вимірі температури продуктів згоряння залежить, від об'єму і типу каталізатора, швидкості потоку аналізованого газу і концентрації в ньому горючих газів, а також від температури, що визначає необхідність для забезпечення більшою мірою згоряння горючих речовин підбору товщини шару каталізатора, його активності, температури і визначення допустимих концентрацій компонентів в газовому потоці.

Як відомо, найбільш стійким до окислення з вуглеводневих газів є метан. Звідси випливає, що пристрій, здатний забезпечити повне каталітичне згоряння метану, свідомо забезпечить згоряння всіх інших вуглеводневих газів. В даний час відомо велика кількість каталізаторів для технологічних цілей переробки горючих газів. Дослідження каталітичного покриття орієнтовані на створення термохімічного детектора, здатного забезпечити отримання вимірювальної інформації про нижчу об'ємну теплоємність згоряння вуглеводневих газів і їх сумішей. При цьому, як випливає з вищесказаного, важливою умовою отримання такої вимірювальної інформації є теплота згоряння горючого газу. Так як найбільш стійким до каталітичного окислення є метан, то відповідно до умов забезпечення каталітичного горіння і визначається тип каталізатора. Цей каталізатор повинен забезпечити каталітичне окислення метану, а отже і всіх інших вуглеводневих газів.

В даний час розроблено велику кількість каталізаторів і експериментально визначена їх найважливіша характеристика - енергія активації [6,8]. Ці каталізатори отримують шляхом осадження, спікання, розкладання суміші оксидів і просоченням адсорбентів. У роботах [6,8] показано, що найбільшою енергією активації мають платино-паладієві каталізатори, одержувані просочуванням оксиду алюмінію солями платиновий групи. Цей факт також підтверджується роботами [7,9], присвяченими вдосконалення каталізаторів для окислення метану і методик їх випробування. Враховуючи вищесказане слід визнати доцільним використання в термохімічному детекторі платино-паладієвих каталізаторів.

Всі відомі термохімічні газоаналізатори працюють в безперервному режимі, відповідно до якого в газоаналізатор безперервно надходить потік аналізованого газу. При цьому формується сигнал газоаналізатора, який безперервно змінюється в часі. При такому режимі роботи термохімічних газоаналізаторів істотним є такі чинники, здатні погіршувати метрологічні характеристики, що входять до їх складу:

- безперервна подача аналізованого газу, що містить горючі компоненти, призводить до поступової зміни властивостей каталітично активного середовища;
- сталість об'ємної витрати аналізованого газу існуючими стабілізаторами витрати може бути забезпечено тільки при дуже малих концентраціях горючих компонентів в аналізованої середовищі;
- для перевірки і коригування початкового рівня сигналу (в відсутності горючих компонентів) необхідно відключення газоаналізатора від технологічного потоку.

З метою продовження тривалості роботи термокаталітичного перетворювача без погіршення метрологічних характеристик запропонований імпульсний режим роботи газоаналізаторів описаний в роботі [10] , суть якого полягає в тому, що через детектор газоаналізатора безперервно з постійним об'ємною витратою прокачується газ-носій (будь-який газ, густина якого постійна). При вимірюванні в потік газоносієм вводиться постійна по об'єму і тиску проба аналізованого газу, густина якого може змінюватися довільно. Ця проба проштовхується газом-носієм, в детектор з постійною об'ємною витратою, що дорівнює витраті газу-носія. Таким чином, детектор здійснює перетворення фізико-хімічного властивості аналізованого газу завжди при постійній об'ємній витраті. На рисунку 2 показана схема газоаналізатора, який працює в імпульсному режимі.

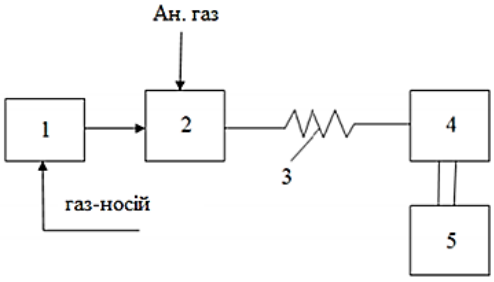



Рисунок 2 – Схема імпульсного газоаналізатора

Тут зі стабілізатора витрати газу 1 газ-носій з постійним об'ємною витратою надходить в дозатор 2 (ручний або автоматичний), а потім в колонку 3, що представляє собою трубку невеликої довжини, і детектор 4. Сигнал останнього вимірюється і реєструється автоматичним потенціометром або комп'ютером 5. Так як склад газу-носія постійний і постійна його густина, то підтримання постійного перепаду тиску на турбулентному дроселі забезпечує стабілізацію його об'ємної витрати. Після введення постійної по об'єму проби аналізованого газу дозатором 2 остання транспортується по порожній колонці 3 в детектор 4. Включення цієї колонки необхідно, так як в момент введення проби ручним або автоматичним дозатором або шприцом порушується аеродинаміка газового потоку, а це у більшості газових детекторів призводить до зміни початкового рівня U0 сигналу U і виникнення деякого імпульсу (рисунок 3).

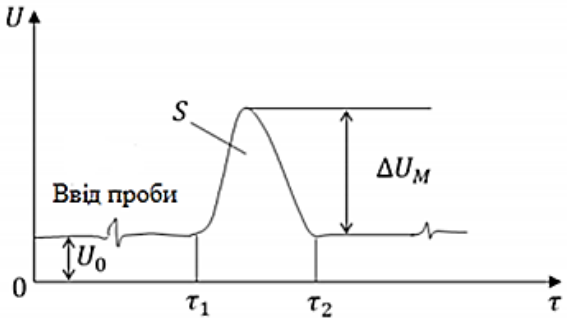



Рисунок 3 - Форма сигналу термокаталітичного детектора в імпульсному режимі

Для того, щоб цей імпульс не накладається на наступний, що представляє собою сигнал детектора, створюється за допомогою названої колонки деякий інтервал часу, за який початковий рівень сигналу детектора приймає колишнє значення. В цей час введена проба аналізованого газу транспортується по колонці. У процесі руху по колонці проба частково розмивається газом носієм. Тому сигнал детектора, що змінюється в часі $\tau$ і що виникає при русі такої розмитою проби через вимірювальну камеру детектора має форму кривої Гаусса. амплітуда *ΔU* М або площа S імпульсного сигналу використовується в якості інформативного параметра. На рисунку 3 показані зміни в часі об'ємної концентрації аналізованого газу в потоці газу-носія α і сигналу детектора *ΔU*.

В роботі [10] для миттєвого значення *ΔU* імпульсного сигналу, його площі S і амплітуди *ΔUM* отримані наступні вирази:

$$\Delta U = k_{П}(П - П_{ГН})\frac{Q_{П}}{Q_{ГН}} = k_{П}(П - П_{ГН})\alpha,$$

$$S = \frac{k_{П}(П - П_{ГН})}{Q_{ГН}}V_{П,}$$

$$\Delta U_{m} = \frac{k_{П}(П - П_{ГН})}{Q_{ГН}(\tau_2 - \tau_1)}V_{П}$$

де: $k_{П}$ - коефіцієнт перетворення детектора по фізико-хімічним властивості; П і Пгн – -фізико-хімічні властивості аналізованого газу і газоносія, відповідно; $Q_{П}$ - парціальна об'ємна *витрата*

аналізованого газу в потоці газу-носія; $Q_{ГН}$ – об'ємна витрата газу-носія; $V_П$ – об'єм проби аналізованого газу, введений на аналіз; - моменти часу появи і зникнення імпульсного сигналу

**Висновки**

1. Використання імпульсного режиму роботи в газоаналізаторах з термокаталітичним перетворювачем дозволить:

- забезпечити сталість об'ємної витрати аналізованого газу в детектор, що є вирішальним фактором забезпечення точності вимірювання теплового ефекту каталітичного згоряння;
- здійснювати процес каталітичного згоряння при малих концентраціях горючих компонентів в потоці газу-носія (повітря) за рахунок підбору об'єму проби, що вводиться в аналізатор, що може забезпечити стабільність властивостей каталізатора протягом тривалого часу;
- контролювати і коригувати початковий рівень сигналу детектора, що визначає адитивну похибка вимірювань, в кожному циклі аналізу і тим самим практично виключити цю похибку. Враховуючи всі описані фактори доцільним є використання імпульсного режиму роботи термохімічного газоаналізатора.

2. В результаті теоретичних досліджень каталітичного покриття встановлено, що найбільш доцільним є використання в термохімічному детекторі платино-паладієвого каталізатора, який має найбільшу енергію активації та здатний забезпечити повне згорання метану, а отже і всіх вуглеводневих компонентів газової суміші.

3. Забезпечивши повне згоряння вуглеводневих компонентів газової суміші на термокаталітичному перетворювачі в реакційній камері, мостової вимірювальної схеми можливо вимірювати нижчу об'ємну питому теплоту згоряння газу. Це визначає можливість використання такого газоаналізатора як газового калориметра.

**Література:**

1. Шинкарук Х.М., Чеховський С.А. Особливості роботи термокаталітичного давача в середовищі природного газу// Перспективні технології та прилади/ Науково-технічний журнал. Луцьк, 2020. Випуск №16, с.155 – 160.

2. Природний газ. Визначення енергії: ДСТУ ISO 15112:2009. – [Чинний від 2011-01-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 2010. – 48 с. – (Національний стандарт).

3. ГОСТ 27193-86 «Газы горючие природные. Метод определения теплоты сгорания водяным калориметром»

4. ГОСТ 22667-82 «Газы горючие природные. Расчетный метод определения теплоты сгорания, относительной плотности и числа Воббе».

5. Шинкарук Х.М. Аналіз методів та засобів вимірювання теплоти згоряння природного газу в Україні та закордоном//Методи та прилади контролю якості/ Науково-технічний журнал. – 2019.- №2(43). - С.78-87.

6. Тарасевич, В.Н. Металлические терморезисторные преобразователей горючих газов/ В.Н. Тарасевич . – Киев: Наук . Думка, 1988. – 284с.

7. Матросова, Н.С. Отечественные термохимические газоанализаторы и их сопоставление с зарубежными / Н.С. Матросова, Сб. Автоматические газоанализаторы.- М.: ЦИНТИЭПП, 1961.- 63-83с

8. Anderson R.B, Stein K.C, Freen J.J., Hofer L.J.E. Catalytic oxidation of methane /ihd. and Eng. Chem.- 1961.- 53,№10.– p. 809-812.

9. Кравченко, В.С. Катализатор для определения метана в рудничной атмосфере/ В.С. Кравченко. и др. Завод. Лаб. –1959-№14.– с.1448.

10 Фарзане, Н.Г. Импульсный ввод анализируемого газа в автоматических анализаторах/ Н.Г. Фарзане, Л.В. Илясов. Измерительная техника, 1971, №4 34-38с

**Shynkaruk H.M., Chekhovsky S.A., Pindus N.M., Romaniv V.M.**
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

## THEORETICALLY IMPREGNATED MOBILITY AND STEERED THERMOCATALITIC METHOD FOR THE DUE TO HEAT OF BURNING OF NATURAL GAS

The possibility of using a thermochemical detector to determine the heat of combustion of natural gas has been theoretically substantiated. It was found that the degree of combustion of combustible gases in thermochemical gas analyzers based on measuring the temperature of combustion products depends on the volume and type of catalyst, the flow rate of the analyzed gas and the concentration of combustible gases in

**©Шинкарук Х.М., аспірант, Чеховський С.А., проф., Піндус Н.М., доц., Романів В.М.**

it, as well as on the temperature, determines the need to ensure a greater degree of combustion of combustible substances. selection of the catalyst layer thickness, its activity, temperature and determination of the permissible concentrations of the components in the gas stream. The use of a pulse mode of operation in gas analyzers with thermocatalytic converters will ensure the constancy of the volumetric flow rate of the analyzed gas into the detector, is a decisive factor in ensuring the accuracy of measuring the thermal effect of catalytic combustion; carry out the process of catalytic combustion at low concentrations of combustible components in the flow of the carrier gas (air) by selecting the sample volume, is introduced into the analyzer, which can ensure the stability of the catalyst properties for a long time.

**Key words:** natural gas, thermocatalytic method, quality of natural gas, calorific value of natural gas.

**Шинкарук Х.М., Чеховский С.А. Пиндус Н.М., Романив В.М.**
Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕРМОКАТАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОД ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОТЫ СГОРАНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Теоретически обоснована возможность применения термохимического детектора для определения теплоты сгорания природного газа. Установлено, что полнота сгорания горючих компонентов газовой смеси на термокаталитические преобразователи в термохимических газоанализаторов будет зависеть от скорости потока пробы газа и концентрации горючих газов в нем, также важен тип и объем применяемого катализатора. Исследовано показало что выходной сигнал газоанализатора будет зависеть от температуры, сгорания горючих веществ и подбора катализатора, его активности и определения допустимых концентраций исследуемых компонентов в потоке газовой смеси. Использование импульсного режима работы в газоанализаторах с термокаталитические преобразователем позволит обеспечить постоянство объемного расхода анализируемого газа в детектор, является решающим фактором обеспечения точности измерения теплового эффекта каталитического сгорания; осуществлять процесс каталитического сгорания при малых концентрациях горючих компонентов в потоке газа-носителя (воздух) за счет подбора объема пробы, вводится в анализатор, который может обеспечить стабильность свойств катализатора в течение длительного времени.

**Ключевые слова:** природный газ, термокаталитический метод, качество природного газа, теплотворная способность природного газа.

**©Шинкарук Х.М., аспірант, Чеховський С.А., проф., Піндус Н.М., доц., Романів В.М.**

## ДО УВАГИ КОРЕСПОНДЕНТІВ!
## ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАННЯ СТАТЕЙ ДО ЗБІРНИКА«ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ»

1. Наукова стаття повинна мати наступні 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 питань загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття; формулювання цілей статті (постановка завдання); структурований виклад матеріалів дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів; чіткі висновки, які відповідають цілям і стану даного дослідження і перспективи подальшої роботи у даному напрямку.

2. Статтю можна подавати українською, російською або англійською мовами. Стаття повинна бути набрана у текстовому редакторі не нижче MS WORD 6.0/7.0 і надрукована тільки на лазерному або струменевому принтері на білих листках формату А4 (290х210 мм). Нумерацію сторінок не виконувати.

3. Параметри сторінки: ліве – 3 см, верхнє, нижнє, праве поле – 2 см. Від краю до колонтитула верхнього – 1,25 см, нижнього – 1,25 см.

4. Шапка статті: індекс УДК, прізвища та ініціали авторів, назва організації – набираються з нового рядка шрифтом Time New Roman Cyr розміром 11 пт з одинарним міжрядковим інтервалом і вирівнюються по лівому краю. Назва статті розміщується на 1 см нижче назви організації, набирається прописними літерами шрифтом Time New Roman Cyr розміром 11 пт з напівжирним виділенням і вирівнюється по центру. Анотація має бути розширеною (об’ємом 1000-1200 знаків), повинні містити короткий виклад статті і розміщуються на 1см нижче назви статті, набираються з абзацного відступу 1см шрифтом Time New Roman Cyr розміром 11пт з одинарним міжрядковим інтервалом і вирівнюються по ширині. Нижче анотацій вказуються ключові слова. Прізвища та ініціали авторів, назва організації, назва статті, анотація, ключові слова подаються українською, російською та англійською мовами, при чому, анотація мовою статті подається на початку, а прізвище, назва організації, назва статті, анотація, ключові слова іншими двома мовами після інформаційних джерел.

5. Основний текст розміщується на 1 см нижче анотацій, набирається з абзацного відступу 1см шрифтом Time New Roman Cyr розміром 11 пт з одинарним міжрядковим інтервалом і вирівнюється по ширині.

6. Для набирання формул застосовувати редактор формул MS WORD (використовувати шрифт для формул Symbol; для тексту – Time New Roman Cyr; розмірами: 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.

7. Наявні ілюстрації розташовувати по тексту, вирівнюючи підписи (Рис. 1. Схема ...) по центру. Другий екземпляр ілюстрації необхідно подати на окремому листі в форматі jpg. Ілюстрації повинні бути чіткими та контрастними.

8. Таблиці розташовувати по тексту, причому їх ширина повинна бути на 1 см менша ширини рядка. Над таблицею поставити її порядковий номер (Таблиця 1) – вирівнюючи по правому краю, під яким розмістити назву таблиці, вирівнюючи по центру.

9. Інформаційні джерела подається загальним списком в кінці рукопису згідно з вимогами державного стандарту через 1 см від останнього рядка.

10. До статті обов’язково додаються відомості про авторів:

- Прізвище, Ім’я, По батькові;
- Місце роботи, посада, науковий ступінь, вчене звання;
- Адреса для отримання збірника, e-mail, телефон.
- Заява на ім’я редакції про те, що стаття не є плагіатом і друкується автором вперше.

Основні наукові спеціальності:

131 Прикладна механіка;
132 Матеріалознавство;
133 Галузеве машинобудування;
151 Автоматизація та комп′ютерно інтегровані технології;
152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка;
153 Мікро-та наносистемна техніка;
163 Біомедична інженерія;
171 Електроніка.

Ці спеціальності тісно пов'язані і доповнюють одна одну у сфері таких напрямків: прилади та системи фізичних та біомедичних технологій; прогресивні технологічні процеси в машино- та приладобудуванні; проблеми технологічного менеджменту та сервісного обслуговування медичної техніки; метрологія, інформаційно-вимірювальні технології, стандартизація та сертифікація; проблеми, теорія та практика підготовки фахівців технічного спрямування в контексті євроінтеграції вищої школи України; фізика напівпровідників та діелектриків та фізика твердого тіла; прилади та методи вимірювання електричних, магнітних та механічних величин.

Редакційна колегія збірника забезпечує рецензування наукових статей, що подаються авторами до опублікування. Дотримані всі вимоги до редакційного оформлення наукового видання згідно державних стандартів України.

Статті приймаються в електронному вигляді – за електронною адресою: **confkptm@gmail.com**, в письмовому вигляді − за поштовою адресою: **43018, м. Луцьк, вул. Потебні, 56, каф. Приладобудування (каб. 40)**, відповідальному редактору В.І. Марчуку постійно протягом року.

***Редакція здійснює рецензування статей у такій послідовності:***

- перевірка статті на відповідність вимогам;
- прийняття рішення щодо прийому статті;
- інформування авторів про можливість *публікації* та *дозвіл на оплату*.

Статті приймаються *українською*, *російською* *або* *англійською* мовами. Вартість публікації становить **60 грн.** за 1 стор.

Оплата проводиться за реквізитами:

Картка Приват банку № 5168 7573 4753 6411

В призначенні платежу слід вказати «**За видання статті у збірнику «Перспективні технології та прилади» від (ПІБ)**».

Квитанцію про сплату надіслати у сканованому вигляді за електронною адресою: **confkptm@gmail.com**.

Сайт видання *http://eforum.lntu.edu.ua/index.php/jurnal*

Видання входить до переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (наказ МОН України від 22.12.2016 № 1604 «Про затвердження рішень Атестаційної колегії Міністерства щодо діяльності спеціалізованих вчених рад від 13 грудня 2016 року»)

Видання має міжнародний стандартний серійний номер ISSN 2313-5352.

Збірник наукових праць "Перспективні технології та прилади" індексується в Google Scholar, Crossref, Scientific Indexing Services у Національній бібліотеці України імені В.І. Вернадського, а також представлено у загальнодержавній технологічній платформі "Наукова періодика України".

Довідки з питань публікації та прийому матеріалів можна отримати у технічного секретаря – **Марчук Ірини Вікторівни** за тел. **(0332) 26-49-43**, 095-862-18-12, або за електронною адресою: **confkptm@gmail.com**.

ДЛЯ НОТАТОК

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

Комп’ютерний набір: Марчук І.В.
Технічний редактор: Марчук І.В..
Відповідальний за випуск Марчук В.І.
Друкується в авторській редакції

Здано у виробн. 28.05.2021 р.
Формат 60х84/16. Гарнітура Time New Roman. Папір офсетний.
Ум. друк арк. 12,5. Обл.-вид. арк.12 Тираж 500 пр. Зам. № 59

Віддруковано у інформаційно-видавничому відділі
Луцького національного технічного університету
43018, Україна, м. Луцьк, вул. Львівська, 75
Свідоцтво Держкомтелерадіо ДК №4123 від 28.07.2011 р.