

ТЕХНІЧНІ НАУКИ

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-272-2-7-14>

УДК 004.77:004.031

ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ ВІДДАЛЕНОГО ДОСТУПУ ДО ІНФОРМАЦІЙНИХ РЕСУРСІВ КОМП'ЮТЕРНИХ ЛАБОРАТОРІЙ

Могильний Г.А., Семенов М.А., Кіреєв І.Ю.

IMPLEMENTATION OF A SYSTEM OF REMOTE ACCESS TO INFORMATION RESOURCES OF COMPUTER LABORATORIES

Mohylnyi H.A., Semenov M.A., Kiryeyev I.Yu.

Організація роботи навчальних комп'ютерних лабораторій в умовах дистанційного навчання пов'язане із низкою питань, зокрема з розробкою та впровадженням системи віддаленого доступу користувачів не лише до навчального контенту але й до ресурсів локальної мережі та сервісного обладнання: програмних засобів та середовищ, серверів, принтерів, цифрових приладів тощо. Тому одна з основних проблем, яка виникає при організації дистанційного навчання здобувачів освіти, зокрема ІТ спеціальностей, є створення умов для комфортного доступу здобувача освіти до комп'ютерної мережі університетської лабораторії – в ідеалі повна імітація роботи в комп'ютерній лабораторії університету при віддаленому доступі. Незважаючи на велику кількість праць, присвячених різним аспектам організації дистанційного навчання проблема створення віддалених навчальних комп'ютерних лабораторій досліджена не достатньо.

У роботі наведено аналіз існуючих підходів та принципів побудови типової інформаційної структури навчальної комп'ютерної лабораторії. На засадах практичного досвіду використання та модернізації такої системи запропоновано ряд технічних рішень спрямованих на організацію віддаленого доступу до внутрішніх інформаційних ресурсів навчальної комп'ютерної лабораторії. З багатьох можливих рішень по створенню інформаційної системи з віддаленим доступом у роботі окреслено три найпростіші та швидкі варіанти їх реалізації. Проаналізовано ряд варіантів організації віддаленого доступу до навчальної комп'ютерної лабораторії, яка побудована за допомогою технології перенаправлення окремих портів на один вузол локальної мережі із різноманітними інформаційними, апаратними та програмними ресурсами, або декілька вузлів, серед яких один сервер віддаленого робочого столу, web-сервер та інші ресурси з окремими IP адресами. Досліджено основні структурні компоненти системи віддаленого доступу на засадах VPN та наведено рекоме-

ндації по їх налаштуванню та застосуванню. Надано основні особливості застосування VPN з використанням роутеру MikroTik. Запропонований підхід дозволив реорганізувати роботу комп'ютерної навчальної лабораторії та створити нові можливості використання інформаційних ресурсів студентами та викладачами ЛНУ імені Тараса Шевченка в умовах запровадження дистанційної освіти в період COVID-19. Практичний досвід використання такого підходу у 2020-2021 рр. довів власну ефективність.

Ключові слова: VPN, Windows Server, навчальна комп'ютерна лабораторія, дистанційне навчання, комп'ютерна мережа, віддалений доступ, порт, протокол, PPTP.

Вступ. Одним із пріоритетних напрямів розвитку сучасної освіти є інформатизація всіх складових навчального процесу. Сучасний етап розвитку інформатизації системи освіти спрямований на подальше підвищення якості освіти, забезпечення конкурентоспроможності національної системи освіти на світовому ринку освітніх послуг, її інтеграцію у світовий освітній простір. Він передбачає реалізацію принципів відкритої освіти, підпорядкований сучасним освітнім парадигмам людиноцентризму та рівного доступу до якісної освіти [4].

Останнім часом в умовах COVID-19, та після 24 лютого 2022 р, коли наша держава була підвернута ворожій агресії зі сторони Російської Федерації та значна кількість навчальних закладів переведена на дистанційний режим роботи особливого значення набули різноманітні засоби інформаційних

комп'ютерних технологій та різноманітні методики їх впровадження у навчальний процес [2].

Безумовно, така складна ситуація, та соціально-економічні виклики суспільства сприяли підвищенню значимості дистанційної освіти в Україні.

Однак, в таких умовах ефективного використання сучасних інформаційних технологій та прогресивних педагогічних засобів навчання неможливе без створення спеціалізованих умов у навчальних комп'ютерних лабораторіях (НКЛ).

Різним питанням організації дистанційного та цифрового навчання присвячено багато наукових праць, зокрема роботи В. Бикова, Н. Морзе, В. Кухаренка, О. Щербини [3, 5, 6, 7]. Але робіт щодо використання віддалених віртуальних лабораторій в українському сегменті наукових досліджень майже немає. Серед світового досвіду заслуговує на увагу досвід університету DEUSTO [1] (м. Більбао, Іспанія). Це засвідчує актуальність цієї статті.

За таких умов, питання організації комп'ютерного середовища у навчальних лабораторіях та комп'ютерних класах ставить нові завдання до організації комп'ютерної мережі та програмно-технічного оснащення [5]. Основною метою цього процесу повинно бути розробка нових підходів до організації виконання лабораторних завдань для студентів та учнів, які знаходяться дома, за межами НКЛ (навчального закладу) шляхом створення умов аналогічних стаціонарній системі навчання.

Аналіз літератури та різноманітних методичних розробок показав, що в цьому напрямку слабо наведені організаційно-методичні засади використання та модернізації існуючого програмно-апаратного забезпечення НКЛ. Більшість авторів запроваджують різноманітні педагогічні підходи та моделі освітнього процесу і всебічно розглядають можливості використання додаткового програмного забезпечення спрямованого на підвищення ефективності взаємодії між учасниками освітнього процесу [3, 7]. Таким чином, передбачається, що всі учасники освітнього процесу використовують засоби особистої (домашньої) обчислювальної техніки.

Однак питання роботи існуючих НКЛ в таких умовах не достатньо розглянуті. В цей час, комп'ютерні класи (лабораторії) практично не готові до нових вимог освітнього процесу та в більшості випадків знаходяться у режимі простою або часткового використання. Безумовно, розробка засобів використання існуючих локальних інформаційних ресурсів НКЛ в умовах дистанційної освіти значно підвищить ефективність всього навчального процесу.

Мета роботи – комплексний аналіз та опис шляхів модернізації інформаційних ресурсів навчальних комп'ютерних лабораторій, спрямований на вирішення проблеми віддаленого доступу до них в умовах дистанційного навчання.

Викладення основних матеріалів. У закладах освіти існує багата кількість НКЛ, які відрізняються як рівнем оснащення обчислювальною технікою так

і різноманітним програмним забезпеченням в залежності від спеціалізації та особливостей навчального процесу. Однак, з точки зору організаційної та мережевої структури можна виділити найбільш поширену типову структуру НКЛ, яка використовується у багатьох закладах середньої освіти та більшості вишів і зовсім не пристосовано до завдань вирішення проблеми надання віддаленого доступу тим хто навчається дистанційно (рис. 1).

Така типова структура ефективно працює при умовах її безпосереднього використання в аудиторії та може включати: мережеве обладнання, робочі станції (персональні комп'ютери), мультимедійне обладнання, файловий сервер та друксервер, які зазвичай об'єднані на засадах однорангової мережі Microsoft. Така структура НКЛ дозволяє ефективно використовувати мережу Інтернет, локальні прилади та локальне програмне забезпечення, але зовсім не пристосована для використання учасниками освітнього процесу в дистанційних умовах.

При такому підході більшість інформаційних ресурсів є слабо керованими та потребують постійної присутності співробітників навчально-допоміжного персоналу.

Тим не менш, значною перевагою цієї інформаційної системи є мала вартість, незначні вимоги до кваліфікації обслуговуючого персоналу, мінімальна програмно-технічна підтримка та можливість забезпечити виконання основних завдань навчального процесу при роботі у стаціонарному (денному, очному) режимі.

Основним недоліком її є відсутність можливостей використати наявну обчислювальну техніку в дистанційних умовах, коли всі учасники освітнього процесу знаходяться поза межами НКЛ.

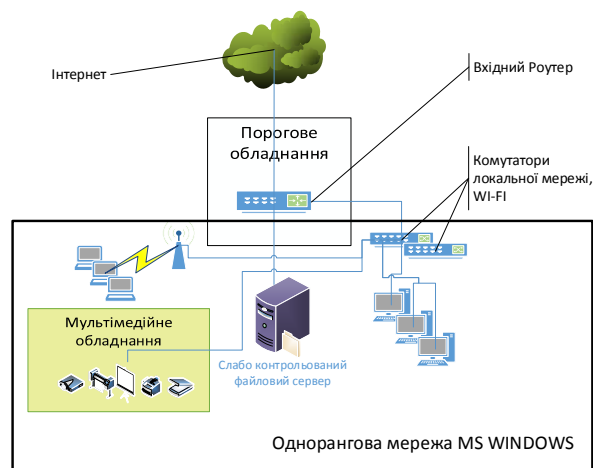


Рис. 1. Типова структура НКЛ

Результати досліджень. Важливим кроком у створенні системи з віддаленим доступом є етапи аналізу та планування всієї інформаційної системи з віддаленим доступом. У загальному випадку необхідно вирішити низьку завдань та обов'язково врахувати наступне:

1. Можливість отримання реальної IP адреси (пула адресів).

2. Кількість, типи та різноманітність інформаційних ресурсів, які повинні бути надані у віддаленому доступі. При цьому, потрібно врахувати необхідні умови основних завдань навчального процесу з метою забезпечення достатньої якості виконання лекційних занять та завдань до лабораторних робіт.

3. Реальний стан наявних інформаційних ресурсів, їх спроможність працювати у безперервному (або необхідному) режимі, можливість їх переналаштування та модернізації.

4. Фінансові можливості придбання додаткового програмного та апаратного забезпечення (комп'ютери, складові комп'ютерів, комплектуючі, програмне забезпечення, роутери, тип мережевої кабельної системи та інше).

5. Наявність та кваліфікація навчально-допоміжного персоналу, спроможного виконати монтаж, налаштування та обслуговування додаткового програмно-апаратного забезпечення.

6. Приблизний термін впровадження запланованих рішень.

У лабораторії ДІСЕНП кафедри ІТС Луганського національного університету імені Тараса Шевченка відповідно до завдань проекту EASMUS+ MoPED було проведено дослідження та впровадження різноманітних варіантів НКЛ з віддаленим доступом. Досвід їх впровадження засвідчив той факт, що завдання аналізу та планування всієї інформаційної системи є складним та багатоітераційним процесом та потребує повного комплексного підходу. Для цього необхідно окреслити основні показники ефективності системи НКЛ з віддаленим доступом. Серед мінімального набору таких показників є: відсоток реалізації елементів навчального плану за допомогою НКЛ, стабільність та наявність підключення, швидкість доступу до інформаційних ресурсів.

В окремих випадках необхідно приймати рішення спрямовані на першочергове виконання завдань, які можливо виконати та впровадити в існуючих умовах. Після їх виконання знову проводити комплексний аналіз. Таким чином вдається поступово досягнути значних результатів у досягненні проміжної мети. Цей процес не повинен зупинятися з метою постійного вдосконалення існуючих рішень інформатизації навчального процесу та підвищення якості дистанційної освіти. Це дозволяє створити передумови створення освітньої екосистеми (яка включає не лише НКЛ) та її сталий розвиток.

Однак, з багатьох можливих рішень по створенню інформаційної системи з віддаленим доступом в межах цієї статті окреслимо тільки декілька швидких та поширених випадків. При цьому будемо вважати, що в нас є реальна IP адреса, в наявності необхідний допоміжний персонал, достатньо фінансових коштів та термін впровадження нас влаштує.

• **Випадок 1.** Всі ресурси розташовані на одному вузлу локальної мережі НКЛ.

• **Випадок 2.** Ресурси різного типу (в кількості одного кожного типу) розташовані на різних вузлах НКЛ, які використовують різні порти TCP/IP. Іншими словами – один ВЕБ сервер, один принтер, один сервер RDP (віддаленого робочого стола) і так далі.

• **Випадок 3.** Повний доступ до всіх ресурсів НКЛ.

Слід зауважити, що перших два випадка можуть бути створені на багатьох типах порогових приладів. У третьому випадку треба проводити ґрунтовний попередній аналіз щодо можливостей наявного програмно-технічного забезпечення.

У межах цієї роботи в якості порогового приладу розглянемо роутер MikroTik RB750Gr3 з операційною системою RouterOS v6.49.6 (stable).

Попередньо, для достовірності даних, скинемо конфігурацію MikroTik (рис. 2, а) та налаштуємо її знову (так як показано на рис. 2, б).

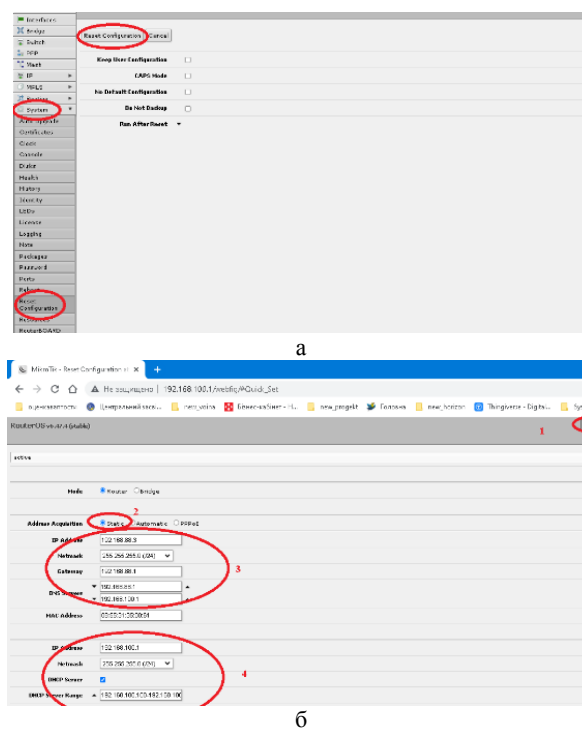


Рис. 2. Скидання конфігурації та попереднє налаштування

Таким чином, будемо вважати, що внутрішня локальна мережа має адресу 192.168.100.0 mask 255.255.255.0, внутрішня адреса порогового приладу (роутеру MikroTik) – 192.168.100.1, зовнішній інтерфейс (підключено Інтернет) – у першому порту – ether1 та має реальну IP адресу, наприклад 91.222.42.145, що надано провайдером за допомогою NAT на адресу 192.168.88.3 (рис. 3).

Один із засобів перевірити зовнішні налаштування роутера MikroTik це перейти із локальної мережі за адресом порогового роутеру, в даному випадку, це: <http://192.168.100.1> та обрати меню «IP» – «Cloud» потім кнопку «Force Update». Після чого

потрібно почекати поки відбудеться оновлення (рис. 4, а) та переглянути отримане повідомлення у верхній частині вікна додатку (рис. 4, б).

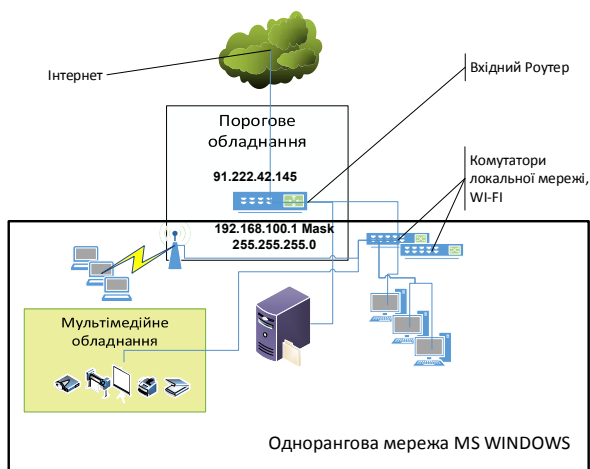
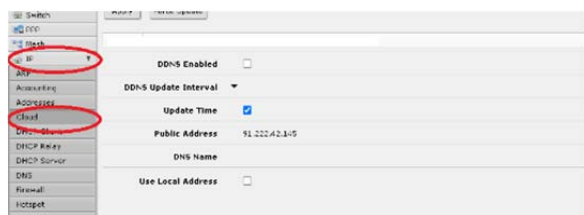
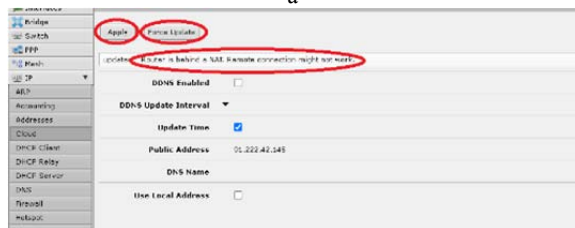


Рис. 3. Приклад адресації мережі НКЛ



а



б

Рис. 4. Перевірка порогового роутеру

Якщо у Вас є повідомлення, як на рис. 2.1, б: «Router is behind a NAT. Remote connection might not work» або «...service might not work», то треба звернутись до провайдера – у вас не має реальної IP адреси. У процесі практичного впровадження з'ясовано, що оновлення працює не стабільно та з великими затримками, а в деяких випадках – не видає помилки навіть в умовах повної відсутності реальної IP адреси.

Розглянемо деякі можливі ситуації. **Випадок перший.** Всі ресурси розташовані на одному вузлу локальної мережі НКЛ – наприклад, на внутрішній адресі – 192.168.100.2. Це самий простий засіб організації віддаленого доступу до НКЛ та не потребує суттєвої переробки інформаційної структури.

Переходимо на сторінку порогового роутеру та вибираємо «IP» – «FireWall», закладка «Nat» (рис. 5) та тиснемо кнопку «Add New» – відобразиться сторінка параметрів (рис 6), на якій вводимо:

Поле Chain – Dstnat (обов'язково) спрямованість пакету. У нашому випадку перенаправлення із зовнішньої мережі на внутрішню.

Поле Dst. Address – 91.222.42.145 (зовнішній IP адрес роутеру), адреса призначення у пакеті. В деяких випадках, провайдер може надавати реальну IP адресу за допомогою свого NAT. В умовах експерименту це 192.168.88.3 – наш роутер використовує протокол NAT провайдера.

Поле In. Interface – ether1 – зовнішній інтерфейс роутеру.

Поле Action – Dst-nat – переадресувати із зовнішньої мережі у внутрішню.

Поле To Addresses – 192.168.100.2 – внутрішня адреса вашого вузла з ресурсами (обов'язково).

Крім того, коли не задавати поля Dst. Address та In. Interface, то це правило буде працювати на всьому зовнішньому трафіку.

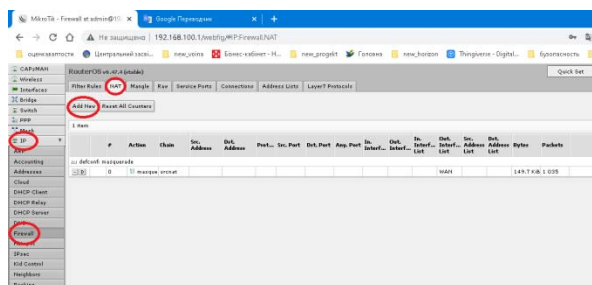


Рис. 5. Перехід до налаштування NAT

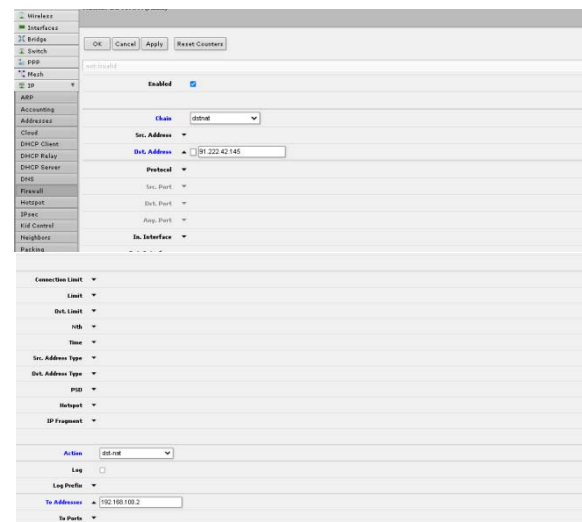


Рис. 6. Налаштування NAT для одного ресурсу

В результаті буде два правила Nat (рис. 7).



Рис. 7. Правила Nat для одного ресурсу

Якщо, налаштовуєте роутер у новому стані, без спеціалізованих налаштувань, то все повинно працювати. В іншому випадку треба переглянути та налаштувати правила «Firewall». В загальному випадку повинно бути 11 правил «Firewall» (у меню «IP» – «FireWall», закладка «Filter Rules» (рис. 8).

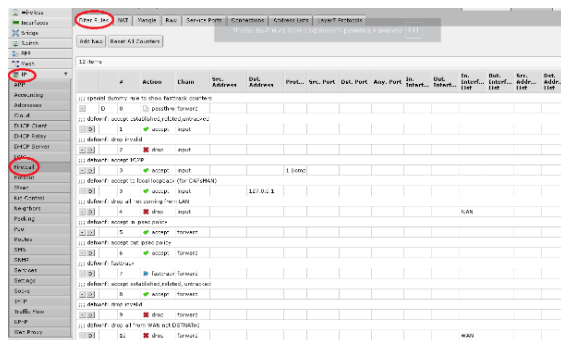


Рис. 8. Правила Filter Rules при першому налаштуванні

Випадок другий. Коли ресурси різного типу розташовані на різних вузлах НКЛ задача організації віддаленого доступу вирішується аналогічно випадку 1, але треба ґрунтовно враховувати особливості протоколів (портів), що використовує кожний ресурс. Наприклад, є файловий ресурс мережі Microsoft на вузлу за адресом 192.168.100.2 та ВЕБ сервер – 192.168.100.7.

Файловий ресурс використовує багато портів, а ВЕБ сервер – порт 80. У такому випадку слід спочатку розташувати правило для ВЕБ серверу, а потім для файлового ресурсу. Слід враховувати, що порядок правил дуже важливий. Рекомендується більш «прості» ресурси розташовувати перед складними (менший номер правила). У будь-якому випадку є можливість змінити послідовність правил, перетягнувши їх мишкою. Таким чином можна надати віддалений доступ багатьом ресурсам, якщо номери портів не співпадають.

Для виконання цього процесу треба знову перейти до правил NAT (рис.5) та додати правило для ВЕБ серверу (рис. 9) з наступними параметрами:

Поле Chain – Dstnat (обов'язково)

Поле Dst. Address – 192.168.88.3 (зовнішній IP адрес роутеру).

Поле Protocol – 6(tcp) – протокол ВЕБ серверу(обов'язково).

Поле Dst. Port – 80 – порт ВЕБ серверу (обов'язково).

Поле In. Interface – ether1 – зовнішній інтерфейс роутеру.

Поле Action – Dst-nat.

Поле To Addresses – 192.168.100.7 – внутрішня адреса ВЕБ серверу (обов'язково).

Потім додаємо правило таке як у Варіанті 1.

У результаті повинно бути три правила (одно за замовчанням – masquerade) – дивись рис. 10.

Для додавання другого ВЕБ серверу з адресом 192.168.100.9, якому теж потрібен порт 80 можна скористатися зміною порту на вхідному інтерфейсі,

наприклад, 8081. Для цього створюємо правило за такою схемою:

Поле Chain – Dstnat (обов'язково).

Поле Dst. Address – 192.168.88.3 (зовнішній IP адрес роутеру).

Поле Protocol – 6(tcp) – протокол ВЕБ серверу(обов'язково).

Поле Dst. Port – 8081 – порт ВЕБ серверу (обов'язково).

Поле In. Interface – ether1.

Поле Action – Dst-nat.

Поле To Addresses – 192.168.100.7 – внутрішня адреса ВЕБ серверу (обов'язково).

Поле To Port – 80 – внутрішня адреса ВЕБ серверу (обов'язково).

У такому випадку у строчці адреса браузера користувачі повинні набрати – <http://192.168.88.3:8081/>

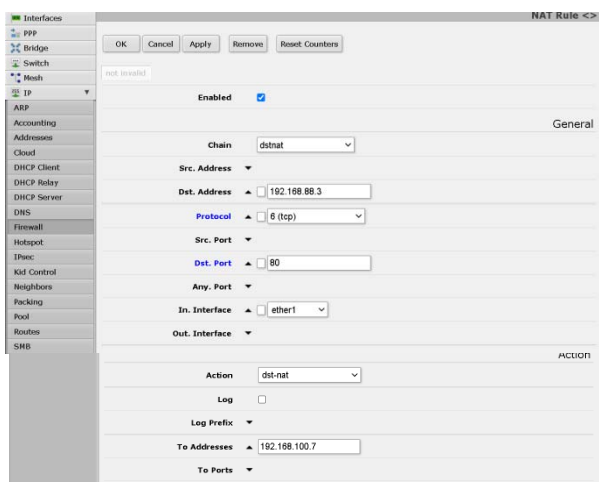


Рис. 9. Налаштування доступу до ВЕБ серверу

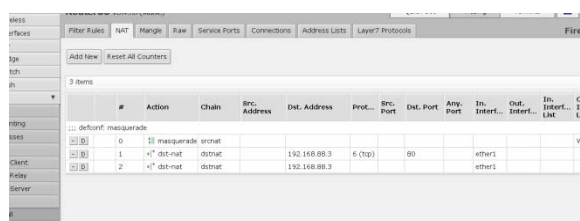


Рис. 10. Набір правил NAT для двох ресурсів

Це правило буде мати номер 3, то перенесемо мишкою його вище на номер 2 (рис. 11) та отримаємо чотири правила.



Рис. 11. Налаштування Nat з двома ВЕБ серверами та файловим ресурсом

Так необхідно створювати правила для багатьох ресурсів. Наприклад, для служби віддаленого робочого столу (192.168.100.13) за такими параметрами:

Поле Chain – Dstnat (обов'язково).

Поле Dst. Address – 192.168.88.3 (зовнішній IP адрес роутеру).

Поле Protocol – 6(tcp) – протокол RDP серверу(обов'язково).

Поле Dst. Port – 13389 – порт RDP серверу (обов'язково).

Поле In. Interface – ether1.

Поле Action – Dst-nat.

Поле To Addresses – 192.168.100.13 – внутрішня адреса RDP серверу (обов'язково).

Поле To Port – 3389 – внутрішня адреса RDP серверу (обов'язково).

У такому випадку у програмі «Підключення до віддаленого робочого столу» треба вказати адресу як показано на малюнку (рис. 12).

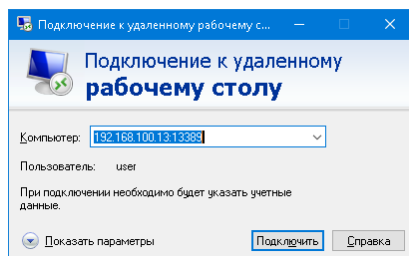


Рис. 12. Варіант підключення до віддаленого робочого столу

Таким чином можна продовжувати створювати правила для всіх ресурсів НКЛ та слідкувати за всіма використаними портами. Такий варіант можливий для простих ресурсів НКЛ, у яких відомо перелік портів та їх можна перенаправити.

Випадок третій. Для отримання повного доступу до всіх ресурсів НКЛ найпростіше скористуватись VPN сервісом. Цей сервіс є у системі роутеру MikroTik. Безумовно, існують і інші засоби створення VPN, наприклад, на сервері Microsoft Windows. Для цього бажано мати сервер з двома мережевими платами та додатково інсталиувати роль «Сервер політики мережі» (NPAS).

VPN буває декілька типів PPTP, L2TP, SSTP, OpenVPN та декілька типів тунелів. Це окреме питання, але в межах статті розглянемо, як організувати найпростішу VPN типу PPTP. Ця VPN має безліч недоліків з питань безпеки, але її налаштування дуже швидке. У випадку якщо ваш роутер не приймав участі у багатьох налаштуваннях та переналаштування та ніколи не активізувався VPN практично все зробить система MikroTik Router OS.

Для початкового налаштування правил FireWale натисніть кнопку «Quik Set» в правому верхньому куті (рис. 13), увімкніть «VPN Access» введіть пароль та натисніть кнопку «Apply Configuration», а потім «WebFig» – у правому верхньому куті.

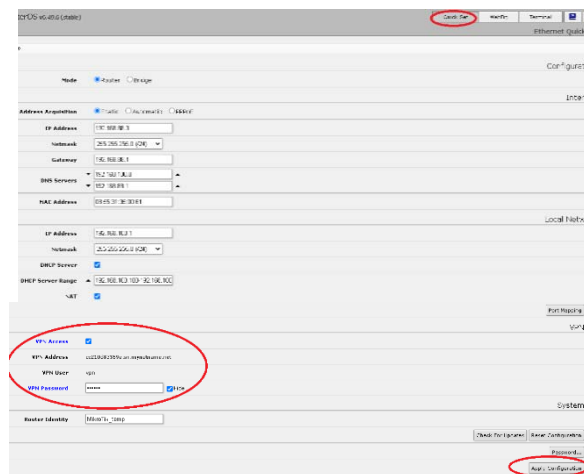


Рис. 13. Перехід до початкових налаштувань VPN

У меню «IP» – «FireWall», закладка «Filter Rules» повинно додатися декілька правил із загальною кількістю – не менш 17. А у меню «IP» – «FireWall», закладка «Nat» – на одно правило більше. Переходимо у «PPP» закладка «PPTP Server» та перевіряємо параметр «Enable» – повинен бути включений (рис.14), звертаємо увагу на поле «Default Profile» – “default encryption”, тиснемо «OK».

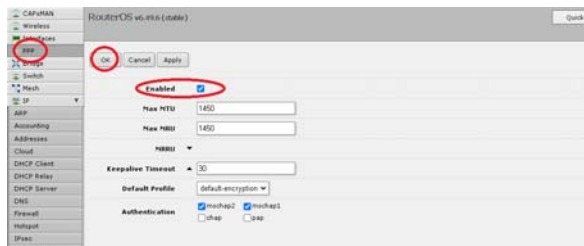


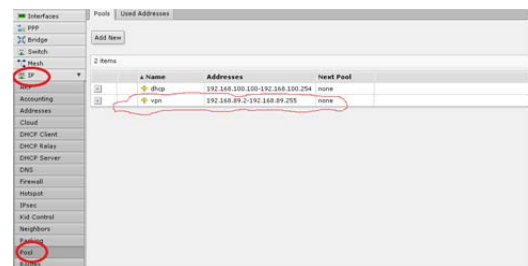
Рис. 14. Включити VPN Server

Потім, у цьому меню переходимо до «L2NP», «SSTP» та «OVPN Server» та їх статус «Enable» тимчасово відключаємо. Перевіряємо меню «IP» – «Pool», «IP» – «Routes» та «PPP» – закладка «Profiles» (рис. 15). Система MikroTik RouterOS створить пул адрес 192.168.89.2 – 192.168.89.255 та додати маршрутизацію на цю мережу 192.168.89.0/24. Важливо врахувати, що пул адрес з назвою VPN, не включає адресу «Profiles» “default-encryption” – 192.168.89.1, а маршрутизація повинна охоплювати всі адреси.

Для остаточного налаштування переходимо у «PPP» – «Secrets» та за аналогією з користувачем VPN створюємо інших користувачів, а користувача VPN змінюємо ім'я з міркувань безпеки, а бо зовсім необхідно видалити (рис. 16).

Це ще не остаточне налаштування, але все повинно працювати. На цьому попереднє налаштування буде завершено. Всі створені користувачі у меню «PPP» – «Secrets» будуть в змозі використовувати VPN клієнта на своїх персональних комп'ютерах після відповідного їх налаштування у додатку «Пара-

метри» – «Мережа та Інтернет» – VPN – «+ Додати VPN підключення» (рис. 17, а) з параметрами, що вказані на рис. 17, б.



а



б



в

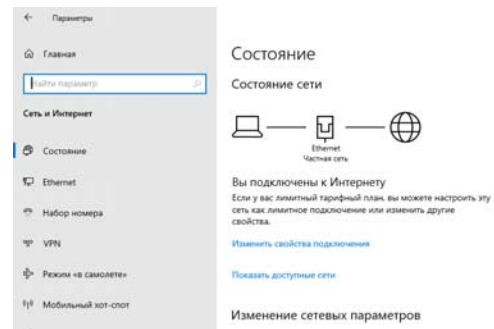
Рис. 15. Перевірка налаштувань



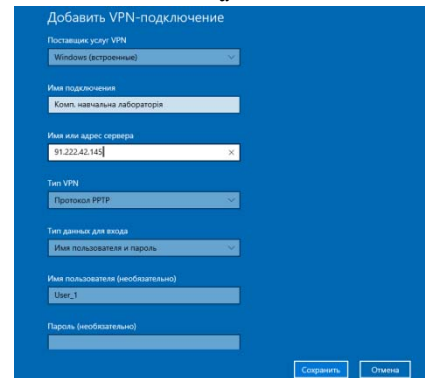
Рис. 16. Створення користувачів VPN у меню «PPP» – «Secrets»

У процесі впровадження цього рішення з'ясувалось ще одна особливість. При використанні VPN з'єднання у даному випадку шлюз за замовчанням буде налаштовано на адресу VPN – 192.168.89.1. Таким чином, в незалежності використання зараз користувачем ресурси НКЛ або ні – увесь трафік Інтернет буде спрямовано на ваш канал та запити на інші ресурси Інтернет будуть проходити через ваше з'єднання. З'ясувалось, що вирішити цей недолік можливо за рахунок використання спеціального додаткового пакету СМАК – пакет адміністратора.

Висновки. У процесі вирішення питання організації віддаленого доступу до навчальних інформаційних ресурсів НКЛ можливо скористатись декількома шляхами та ретельно провести основні етапи планування всієї інформаційної системи.



а



б

Рис. 17. Налаштування користувача

Один з ефективних шляхів – це використати в якості порогового приладу роутер MikroTik RB750Gr3 з оперативною системою RouterOS.

У випадку коли ресурси різного типу розташовані на різних вузлах НКЛ (або всі ресурси на одному вузлу) задача організації віддаленого доступу вирішується шляхом переназначення портів, але треба ґрунтовно враховувати особливості протоколів (портів), що використовує кожний ресурс та створити відповідні правила у «IP» – «FireWall», закладка «Filter Rules» та «NAT».

З іншого боку самий простий, але більш ефективний спосіб організації віддаленого доступу до основних ресурсів НКЛ – це скористатися системою VPN, яка швидко налаштовується на роутері MikroTik RB750Gr3.

Основний недолік цього засобу – це відсутність єдиного контрольованого доступу, створення умов використання тільки основних серверних машин та значні складності використання та контролювання локальних комп'ютерів НКЛ. Всі комп'ютери, окрім серверів, будуть простоювати.

Такий засіб є найпростішим, але далеко не єдиним та остаточним. Існує ще багато підходів заснованих на використанні Microsoft Windows Server та систем віртуалізації, наприклад рішеннях VMware (ESXi, vsphere) або Citrix (XenServer). Однак вони потребують значних додаткових коштів та спеціалізованих фахівців для налаштування.

Література

1. Deusto LearningLab. URL: <https://learninglab.deusto.es/> (date of access: 02.05.2022).
2. Sysoieva S. DIGITALIZATION OF EDUCATION: PEDAGOGICAL PRIORITIES. Education: Modern Discourses. 2021. No. 4. P. 14–22. URL: <https://doi.org/10.37472/2617-3107-2021-4-02> (date of access: 04.05.2022).
3. Морзе Н.В. Моделі ефективного використання інформаційно-комунікаційних та дистанційних технологій навчання у вищому навчальному закладі. Інформаційні технології і засоби навчання. 2008. № 2 (6).
4. Стратегія розвитку вищої освіти в Україні на 2022 – 2032 роки. Міністерство освіти і науки України. URL: <https://mon.gov.ua/storage/app/media/news/2022/04/15/VO.plan.2022-2032/Stratehiya.rozv.VO-23.02.22.pdf> (дата звернення: 01.05.2022).
5. Теорія та практика змішаного навчання: монографія / В.М. Кухаренко та ін. Харків. Міськдрук, НТУ «ХПІ», 2016. 284 с.
6. Технологія розробки дистанційного курсу: навч. посіб. / В. Биков та ін. Київ: Міленіум, 2008. 324 с.
7. Щербина О.А. Нові засоби для оцінювання компетентностей в Moodle. Інформаційні технології і засоби навчання. 2016. № 55 (5). С. 96 – 104.

References

1. Deusto LearningLab. (2022). <https://learninglab.deusto.es/>
2. Sysoieva, S. (2021). DIGITALIZATION OF EDUCATION: PEDAGOGICAL PRIORITIES. Education: Modern Discourses, (4), 14 – 22. <https://doi.org/10.37472/2617-3107-2021-4-02>
3. Morze, N.V. (2008). Modeli efektyvnoho vykorystannia informatsiino-komunikatsiinykh ta dystantsiinykh tekhnolohii navchannia u vyshchomu navchalnomu zakladi. Informatsiini tekhnolohii i zasoby navchannia, 2 (6).
4. Stratehiia rozvytku vyshchoi osvity v Ukraini na 2022 – 2032 roky. (2022). Ministerstvo osvity i nauky Ukrainy. <https://mon.gov.ua/storage/app/media/news/2022/04/15/VO.plan.2022-2032/Stratehiya.rozv.VO-23.02.22.pdf>
5. Kukharenko, V., Berezenska, S., Buhaichuk, K., Oliinyk, N., Oliinyk, T., Rybalko, O. (2016). Teoriia ta praktyka zmishanoho navchannia: monohrafiia. Miskdruk. NTU “KhPI”, 2016. 284 p.
6. Bykov, V., Kukharenko, V., Syrotenko, N., Rybalko, O., Bohachkov, Yu. (2008). Tekhnolohiia rozrobky dystantsiinooho kursu: navch. posib. Milenium. 2008. 324 p.
7. Shcherbyna, O.A. (2016). Novi zasoby dlia otsiniuvannia kompetentnostei v Moodle. Informatsiini tekhnolohii i zasoby navchannia, 55 (5), pp. 96 – 104.

Mohylnyi H. Semenov M., Kiryeyev I. Implementation of a system of remote access to information resources of computer laboratories

The organization of learning computer laboratories in conditions of distance learning is associated with a number of issues, including the development and implementation of remote access to not only educational content but also resources of local network and service equipment: software and environments, servers, printers, digital devices, etc. Therefore, one of the main challenges in organization of distance learning for students, including IT specialties, is to create conditions for convenient access of students to the computer network of the university laboratory - ideally a complete simulation of work in the university computer laboratory with remote access. Despite the large number of papers dedicated to various aspects of distance learning, the problem of creating remote learning computer labs has not been sufficiently studied. The paper presents an analysis of existing approaches and principles of building a typical information structure of the learning computer laboratory. Based on the practical experience of using and modernizing such a system, a number of technical solutions aimed at organization of remote access to internal information resources of the learning computer laboratory are proposed. Of the many possible solutions for creating an information system with remote access, the three simplest and fastest options for their implementation are outlined. A number of options for organization of remote access were analyzed, in which the learning computer laboratory is built using the technology of redirection of individual ports to one node of the local network with various information, hardware and software resources, or several nodes, including one remote desktop server, web server and other resources with individual IP addresses. The main structural components of the remote access system based on VPN are studied and recommendations for their configuration and application are provided. The main features of VPN application using MikroTik router are given. The proposed approach allowed to reorganize the work of the learning computer laboratory and create new opportunities for the use of information resources by students and teachers of Luhansk Taras Shevchenko National University in conditions of distance learning that was introduced during the COVID-19 pandemic. The practical experience of using such an approach in 2020-2021 has proved its effectiveness.

Keywords: VPN, Windows Server, computer training lab, distance learning, computer network, remote access, port, protocol, PPTP.

Могильний Геннадій Анатолійович – к.т.н., доц., директор Навчально-наукового інституту фізики, математики та інформаційних технологій, Луганський національний університет імені Тараса Шевченка (м. Старобільськ), g.mogilnyi@gmail.com

Семенов Микола Анатолійович – к.пед.н., доц., завідувач кафедри інформаційних технологій та систем Навчально-наукового інституту фізики, математики та інформаційних технологій, Луганський національний університет імені Тараса Шевченка (м. Старобільськ), nick@luguniv.edu.ua

Кірсев Ігор Юлійович – к.т.н., доц., доцент кафедри інформаційних технологій та систем Навчально-наукового інституту фізики, математики та інформаційних технологій, Луганський національний університет імені Тараса Шевченка (м. Старобільськ)

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-272-2-15-22>

УДК 621.646:62-83:629

МЕТОДИКА ПРОЕКТНОГО РОЗРАХУНКУ АВТОМАТИЧНОГО ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНОГО ПРИВОДУ ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ ТА ОБ'ЄМНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

Голубенко О.Л., Романченко О.В., Соколов В.І., Степанова О.Г.

METHOD OF DESIGN CALCULATION FOR AUTOMATIC ELECTROHYDRAULIC DRIVE OF ROTARY MOTION AND VOLUME REGULATION

Golubenko O.L., Romanchenko O.V., Sokolov V.I., Stepanova O.G.

Робота присвячена розробці автоматичних електрогідравлічних приводів технологічного обладнання. Представлена методика проектного розрахунку автоматичного електрогідравлічного приводу обертального руху та об'ємного регулювання. Методика проектного розрахунку дозволяє оцінювати основні параметри та вибирати елементи і пристрої приводу по значенням максимального моменту навантаження та частоти обертання валу гідромотора, прогнозувати статичні та динамічні характеристики приводу. Вхідними даними для розрахунку гідроприводу з обертальним рухом приймаються наступні параметри: $M_{\max}$ – максимальний момент навантаження; $n_{\max}$ – максимальна частота обертання; J – приведений момент інерції ротора. Об'ємний гідропривід з регульованим насосом і нерегульованим гідромотором найбільш поширений. Гідроприводи з такою структурою застосовуються в багатьох видах обладнання та забезпечують плавний пуск і безступінчасте регулювання швидкості руху робочого органу обладнання за допомогою одного керуючого органу. Робоча рідина вибирається виходячи з технічних вимог, які пред'являються до обладнання або рекомендацій із технічних даних основного гідравлічного обладнання -насоса і гідромотора, а також з урахуванням режиму роботи електрогідравлічного приводу технологічного обладнання, кліматичних і температурних умов. Запропонована система автоматичного керування приводом, що враховує шум спостереження та стохастичне збурення об'єкта керування. Виконано приклад проектного розрахунку автоматичного електрогідравлічного приводу технологічного обладнання для наступних вхідних даних: максимальний момент навантаження $M_{\max} = 120 \text{ Н}\cdot\text{м}$; максимальна частота обертання $n_{\max} = 2100 \text{ об/хв}$; приведений момент інерції частин, що обертаються, $J = 0,8 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. Показана можливість використання аксіально-поршневого насоса з похилим диском, що серійно випускається, та нерегульованого гідромотору з похилою шайбою. На основі паспортних даних визначені параметри математичної моделі приводу як об'єкта автоматичного керування. Виконані дослідження динамічних характеристик системи.

Ключові слова: машинобудування, залізничний транспорт, інженерна методика, електрогідравлічний привід, об'ємне регулювання, автоматична система керування, передавальна функція, динамічні характеристики.

Постановка проблеми. Використання гідравлічного приводу в машинобудуванні, на залізничному транспорті та в інших галузях промисловості дозволяє спростити кінематику, знизити матеріалоємність, підвищити точність, надійність та рівень автоматизації технологічного обладнання [1-5]. Досягнення довільної кінематики робочого органу та можливості реалізації оптимальних законів їх руху забезпечується використанням автоматичних електрогідравлічних приводів з об'ємним регулюванням в обладнанні потужністю понад 5 кВт. Переваги об'ємного способу регулювання над дросельним обумовлені суттєво меншими втратами енергії та більшою жорсткістю навантажувальної характеристики. Недоліками є конструктивна складність та підвищена вартість регульованих гідравлічних машин [6-10].

У цьому зв'язку, актуальною є задача розробки методик проектного розрахунку автоматичних електрогідравлічних приводів (ЕГП) технологічного обладнання з об'ємним регулюванням.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. В загальному випадку існують різноманітні схеми гідравлічних приводів з об'ємним регулювання, які відрізняються циркуляцією робочої рідини, способом об'ємного регулювання та розгалуженістю потоків енергії [11-15].

Відомі гідравлічні приводи із замкнутою та розімкнутою циркуляцією робочої рідини. Об'ємні гідроприводи із замкнутою циркуляцією робочої рідини мають порівняно менші габаритні розміри і масу

за інших рівних умов. Замкнута циркуляція робочої рідини застосовується при використанні гідродвигунів з однаковими ефективними площами робочих камер. Важливими властивостями об'ємних гідропроводів із замкнутою циркуляцією робочої рідини є можливість гальмування робочого механізму та опір попутному навантаженню за допомогою приводного двигуна замість дроселювання потоку рідини, що істотно знижує нагрівання рідини і забезпечує в зазначених режимах роботи рекуперацію електричної енергії [16-20].

Регулювати швидкість гідропроводу можна за допомогою регульованого насоса, регульованого гідромотора або за допомогою двох регульованих гідромашин разом. Об'ємний гідропривід з регульованим насосом і нерегульованим гідромотором найбільш поширений. Гідропроводи з такою структурою застосовуються в багатьох видах обладнання та різних механізмах [21-25]. Розглянутий гідропривід забезпечує плавний пуск і безступінчасте регулювання швидкості руху робочого органу обладнання за допомогою одного керуючого органу.

Мета статті. Метою даної роботи є розробка інженерної методики проектного розрахунку автоматичного ЕГП обертового руху та об'ємного регулювання.

Матеріали та результати дослідження. Для проектного розрахунку автоматичного ЕГП обертового руху та об'ємного регулювання можна запропонувати інженерну методику, яка дозволяє по значенням максимального моменту навантаження та частоти обертання валу гідромотора виконувати оцінку основних параметрів та вибір елементів і пристроїв приводу, а також прогнозувати його статичні та динамічні характеристики.

Вхідними даними для розрахунку гідропроводу з обертовим рухом необхідно прийняти наступні параметри: M_{max} – максимальний момент навантаження (нм); n_{max} – максимальна частота обертання (об/хв); J – приведений момент інерції ротора, (кгм²). Зауважимо, що одиниці виміру вхідних даних прийняті відповідно до існуючих методик проектного розрахунку гідропроводів [1, 2, 6, 10].

Проектний розрахунок виконуємо в наступному порядку.

1. Побудова розрахункової та гідравлічної схеми гідропроводу обертового руху та об'ємного регулювання.

В структурній схемі відображаються основні елементи та пристрої приводу, формуються зв'язки між ними. За основу розрахункової та принципової схем гідропроводу обертового руху та об'ємного регулювання можуть бути взяті схеми, що представлені у роботах [1, 2, 20, 22].

Розглянемо особливості побудови структури силової частини автоматичного ЕГП технологічного обладнання. Схема гідропроводу з розімкнутою циркуляцією робочої рідини єдина можлива при використанні гідродвигунів з різними ефективними площами робочих камер. Коли робочий орган обла-

днання приводиться до руху одноштоковим гідроциліндром, то потоки в напірній та зливній гідролініях суттєво відрізняються одна від другої. Це змушує застосовувати розімкнуту циркуляцію рідини, використовувати реверсивний гідророзподільвач і встановлювати самовсмоктувальний насос. Регульовальний механізм неревверсивного насоса простіше, ніж насоса з підживленням. Але габаритні розміри самовсмоктувального насоса значно більші, ніж насоса з підживленням. Необхідно вказати на помітну зміну об'єму рідини в гідробаку при роботі одноштокового гідроциліндра. Торкаючись питання використання в якості гідродвигуна гідроциліндра, слід зауважити, що в технологічному обладнанні поступовий рух можна перетворювати в обертальний або поворотний за допомогою важеля, зубчато-рейкового або гвинтової передачі.

Як зазначалося вище, об'ємний гідропривід з регульованим насосом і нерегульованим гідродвигуном найбільш поширений. Гідропроводи з такою структурою можна застосовувати в багатьох видах обладнання та різних механізмах. Розглянутий гідропривід забезпечує плавний пуск і безступінчасте регулювання швидкості робочого органу обладнання за допомогою одного керуючого органу.

2. Вибір робочої рідини та номінального робочого тиску P_{nom} .

Робоча рідина виконує основну функцію передачі енергії до гідродвигуна від насоса, а також ряд важливих призначень: змащення тертьових поверхонь деталей; видалення продуктів зносу тертьових пар, оберігаючи їх від корозії; охолодження гідравлічної системи [2, 6, 17]. Тому, правильність вибору робочої рідини визначає працездатність та довговічність гідрообладнання.

В автоматичних гідропроводах технологічного обладнання застосовуються тільки загущені мінеральні масла, що володіють хорошою змащувальною здатністю, хімічною стабільністю при підвищених температурах, високими антикорозійними і протипожежними властивостями.

Як правило, робоча рідина вибирається виходячи з технічних вимог, які пред'являються до обладнання або рекомендацій із технічних даних основного гідравлічного обладнання – насоса і гідромотора, а також з урахуванням режиму роботи ЕГП технологічного обладнання, кліматичних і температурних умов.

Тиск в гідросистемі, крім того, залежить від типу застосованого насоса та призначення гідропроводу на даному обладнанні. Чим більше потужність або навантаження робочого механізму, що приводиться в рух, тим більше має бути тиск насоса. Малі тиски призводять до зростання габариту і ваги, але сприяють плавній та стійкій роботі; великі тиски знижують габарити і вагу, ускладнюють конструкцію та експлуатацію гідросистем, зменшують довговічність гідрообладнання. Номінальний тиск зазвичай вибирають на підставі існуючих рекомендацій та статистичних даних, отриманих при практичному

використанні даного обладнання.

Номінальне значення робочого тиску в гідро-системі p_{nom} задається із стандартного ряду, МПа: ... 6,3; 10; 12,5; 16; 20; 25; 32; 40 ...

3. Визначення робочого об'єму і вибір гідромотора.

Робочий об'єм гідромотора q_m з урахуванням гідравлічних втрат в системі оцінюється за виразом

$$q_m \geq (1,2 \dots 1,5) \frac{2\pi M_{max}}{p_{nom}}. \quad (1)$$

За параметрами q_m і p_{nom} з урахуванням n_{max} із номенклатури гідрообладнання, що серійно випускається, обирається гідромотор. В гідравлічних приводах середньої та великої потужності (понад 10 кВт) переважно застосовуються роторно-поршневі гідромашини, які володіють високим ККД (0,85...0,92) та прийнятні масогабаритні показники (0,5...10 кг/кВт).

При відсутності відповідного двигуна, що серійно випускається, складається технічне завдання на розробку оригінального гідромотора.

В подальших розрахунках розглядається паспортне значення робочого об'єму гідромотора q_m .

4. Вибір насоса.

При оцінці максимального робочого об'єму $q_{p,max}$ регульованого насоса слід врахувати об'ємні втрати в гідросистемі (витоки), а також задати в розрахунок номінальну частоту обертання валу насоса, яка може бути прийнята із паспортних даних насосів, що використовуються для даного типу обладнання.

Тому, максимальний робочий об'єм насоса рекомендується оцінити відповідно виразу

$$q_{p,max} \geq (1,1 \dots 1,2) q_m \frac{n_{max}}{n_{p,nom}}, \quad (2)$$

де $n_{p,nom}$ — номінальна частота обертання валу насоса.

За параметрами $q_{p,max}$ і p_{nom} із номенклатури гідрообладнання, що серійно випускається, обирається насос. Слід відзначити, що при виборі насосів також переважно орієнтуються на роторно-поршневі гідромашини.

В подальших розрахунках розглядається паспортне значення максимального робочого об'єму насоса $q_{p,max}$.

5. Визначення параметрів математичної моделі ЕГП.

При допущенні абсолютно жорсткої навантажувальної характеристики структурну схему математичної моделі згідно з роботами авторів [20, 22, 24] можна подати у вигляді, наведеному на рис. 1, де позначені наступні параметри: T_{rp} — постійна часу процесу регулювання робочого об'єму насоса;

T_{pd} — постійна часу силової частини приводу; $k_{\gamma U}$ — коефіцієнт передачі для кута γ нахилу шайби (блоку циліндрів) по керуючій напрузі U ; $k_{\Omega \gamma}$ — коефіцієнт передачі силової частини приводу (коефіцієнт передачі для швидкості обертання Ω по куту нахилу шайби); α — кут повороту валу гідромотора; S — змінна Лапласа.

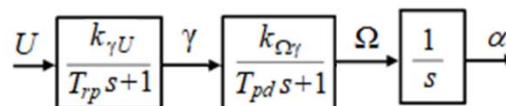


Рис. 1. Структурна схема математичної моделі

Коефіцієнт передачі для величини кута нахилу похилої шайби насоса по керуючій (вхідній) напрузі

$$k_{\gamma U} = \frac{\gamma_{ном}}{U_{ном}} \approx \frac{\gamma_{max}}{U_{max}}, \quad (3)$$

де $\gamma_{ном}$, $U_{ном}$, γ_{max} , U_{max} — номінальні та максимальні паспортні значення кута нахилу похилої шайби (блоку циліндрів) та напруги керування.

Коефіцієнт передачі силової частини ЕГП (коефіцієнт передачі для швидкості обертання по куту нахилу похилої шайби)

$$k_{\Omega \gamma} \approx \frac{\Omega_p}{\gamma_{max}} \frac{q_{p,max}}{q_m}. \quad (4)$$

де Ω_p — номінальна швидкість обертання валу насоса (рад/с), яка зв'язана з його частотою обертання (об/хв) залежністю

$$\Omega_p = \frac{\pi n_{p,ном}}{30}. \quad (5)$$

Якщо математична модель розглядається для безрозмірних змінних:

$$\bar{\gamma} = \gamma / \gamma_{max}; \quad (6)$$

$$\bar{\Omega} = \Omega / \Omega_{max}; \quad (7)$$

де $\Omega_{max} = \Omega_p q_{p,max} / q_m$ — максимальна швидкість обертання гідромотора; то неважко помітити, що коефіцієнти передач (3), (4) в даному випадку рівні одиниці

$$k_{\gamma U} = 1; \quad k_{\Omega \gamma} = 1. \quad (8)$$

Постійна часу процесу регулювання робочого об'єму насоса T_{rp} може бути безпосередньо задана в паспортних даних насоса, або побічно визначена із паспортних динамічних характеристик таких, як час спрацювання при різкій зміні витрати масла, час реверсування потоку масла та ін.

Постійну часу силової частини гідроприводу T_{pd} відповідно до [20, 22] можна оцінити за виразом

$$T_{pd} = 2 \zeta_m T_m. \quad (9)$$

Визначення коефіцієнта відносного демпфування ζ_m гідромотора є складним, тому на стадії проектного розрахунку рекомендується задати

$$\zeta_m \approx 0,4 \dots 1,2. \quad (10)$$

Так як невідомі конструктивні розміри трубопроводів, складним також являється визначення постійної часу гідромотора T_m . Цілком доречно попередньо задати об'єми трубопроводів $W_0 = (2 \dots 10) q_m$, тому згідно [20, 22] постійну часу гідромотора T_m можна оцінити за виразом

$$T_m \approx (6 \dots 14) \sqrt{\frac{J}{q_m E_f}}. \quad (11)$$

Таким чином, визначені основні передавальні функції математичної моделі ЕГП обертового руху та об'ємного регулювання як об'єкта керування

$$W_{rp}(s) = \frac{k_{\gamma U}}{T_{rp}s + 1}, \quad W_{pd}(s) = \frac{k_{\Omega \gamma}}{T_{pd}s + 1}. \quad (12)$$

6. Оцінка статичних характеристик гідроприводу.

Зазвичай практичний інтерес викликає швидкісна статична характеристика – залежність швидкості обертання від напруги керування $\Omega(U)$ для ненавантаженого приводу, навантажувальна характеристика – залежність швидкості (частоти) обертання від моменту навантаження $\Omega(M)$ при номінальному об'ємі регульованого насоса, а також залежності споживаної потужності від швидкості обертання $N(\Omega)$ та ККД від глибини регулювання $\eta(\Omega)$.

Експериментальні статичні характеристики можна отримати на спеціалізованому стенді, приклад якого розглянутий у розділі 3.

Методики розрахунку статичних характеристик гідроприводів об'ємного регулювання достатньо повно викладені в технічній літературі [1, 6], які відрізняються ступенем прийнятих допущень.

7. Синтез системи автоматичного керування (САК).

Методика розробки САК ЕГП обертового руху та об'ємного регулювання для технологічного обладнання детально розглянута в роботах [24, 26-28]. Для ЕГП обертового руху можна рекомендувати САК, яка враховує шум спостереження та стохастичне обурення об'єкта управління, структурна схема якої представлена на рис. 2.

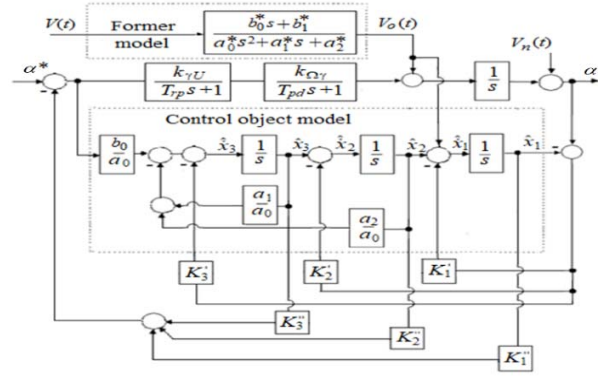


Рис. 2. Структурна схема САК

На схемі позначено: α^* – заданий закон керування куту повороту валу гідромотора; x_1, x_2, x_3 – фазові змінні; K'_1, K'_2, K'_3 – коефіцієнти підсилення фільтра Калмана-Бюсі; K''_1, K''_2, K''_3 – коефіцієнти підсилення зворотного зв'язку регулятора; $V_0(t)$ – кольоровий шум об'єкта керування; $V_n(t)$ – білий шум спостереження; $b_0^*, b_1^*, a_0^*, a_1^*, a_2^*$ – коефіцієнти передавальної функції формувача кольорового шуму об'єкта керування;

$$a_0 = T_{rp} T_{pd}; \quad a_1 = T_{rp} + T_{pd}; \quad a_2 = 1; \quad a_3 = 0; \quad (13)$$

$$b_0 = K_{\gamma U} K_{\Omega \gamma}. \quad (14)$$

Покажемо приклад проектного розрахунку параметрів автоматичного ЕГП технологічного обладнання для наступних вхідних даних: максимальний момент навантаження $M_{max} = 120 \text{ Нм}$; максимальна частота обертання $n_{max} = 2100 \text{ об/хв}$; приведений момент інерції рухомих частин, $J = 0,8 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$.

Далі приводимо основні результати розрахунку.

Приймаємо схему ЕГП при замкнутій циркуляції рідини з регульованим насосом і нерегульованим гідродвигуном. Розрахункова та принципова схеми гідроприводу приведені на рис. 3. Відзначимо позначення гідромашин і гідроапаратів на рис. 3. Тут Р1 ... Р2 – насоси; НМ – гідромотор; CV1 ... CV2 – клапани зворотні; SV1 ... SV4 – клапани запобіжні; F – фільтр.

Обираємо масло індустриальне ІГП-30. Приймаємо номінальний робочий тиск в гідросистемі $p_{nom} = 20 \text{ МПа}$.

Робочій об'єм гідромотора

$$q_m \geq (1,2 \dots 1,5) \frac{2\pi M_{max}}{p_{nom}} = 1,3 \cdot \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 120}{20 \cdot 10^6} = 49 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 = 49 \text{ см}^3.$$

Обираємо нерегульований аксіально-поршневий гідромотор з похилою шайбою **MFS 52** (продукція ПрАТ «Гідросила АПМ», Україна), що має наступні основні паспортні параметри:

робочий об'єм $51,6 \text{ см}^3$;

номінальний тиск $22,5 \text{ МПа}$;

максимальна частота обертання валу 3100 об/хв ;

номінальна частота обертання валу 1500 об/хв;
номінальна потужність 29 кВт.

В подальшому розглядаємо паспортне значення
робочого об'єму гідромотора $q_m = 51,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$.

Максимальний робочий об'єм насоса

$$q_{p, \max} \geq (1,1 \dots 1,2) q_m \frac{n_{\max}}{n_{\text{ном}}} = 1,15 \cdot 51,6 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{2100}{1500} = 83,08 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \approx 83 \text{ см}^3.$$

Обираємо регульований аксіально-поршневий
насос з похилім диском **PVS 90 EP** з електричним
пропорційним керуванням (продукція ПрАТ «Гідро-
сила АПМ», Україна), що має наступні основні пас-
портні параметри:

максимальний РОН 89 см³;
номінальний тиск 22,5 Мпа;
номінальна частота обертання валу 1500 об/хв;
максимальний кут нахилу шайби ± 18 град;
максимальна напруга керування ± 24 В;
номінальна потужність 63,3 кВт.

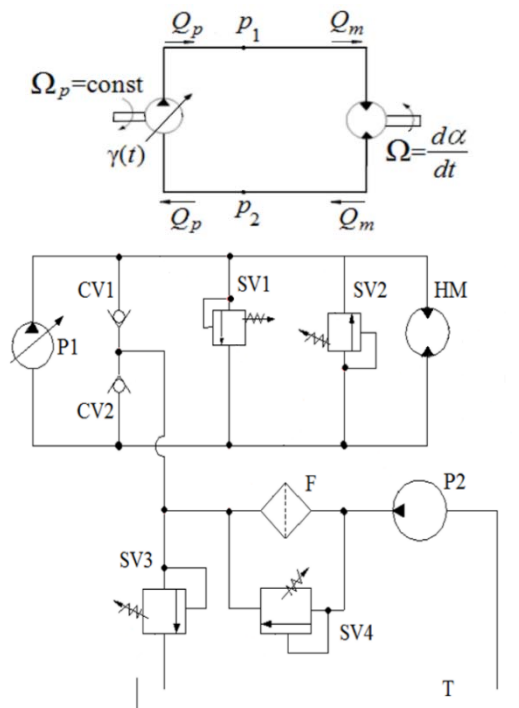


Рис. 3. Розрахункова та принципова схеми гідроприводу

В подальшому розглядаємо паспортне значення
максимального робочого об'єму насоса
 $q_{p, \max} = 89 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$.

Аналіз динамічних характеристик насосів даної
серії показує, що для процесу регулювання робочого
об'єму насоса постійна часу може налаштовуватися
та знаходиться в межах $T_{rp} = 0,1 \dots 1,1$ с. В подальших
розрахунках приймаємо $T_{rp} = 0,17$ с.

Математичну модель ЕГП обертального руху та
об'ємного регулювання технологічного обладнання
розглядаємо для безрозмірних змінних (6), (7), тому
маємо

$$k_{\gamma U} = 1; k_{\Omega \gamma} = 1.$$

Далі

$$\zeta_m = 1,0;$$

$$T_m = 10 \sqrt{\frac{0,8}{51,6 \cdot 10^{-6} \cdot 1,0 \cdot 10^9}} \approx 0,04 \text{ с};$$

$$T_{pd} = 2 \cdot 1,0 \cdot 0,04 = 0,08 \text{ с}.$$

Остаточно отримуємо

$$W_{rp}(s) = \frac{1}{0,17s + 1}, \quad W_{pd}(s) = \frac{1}{0,08s + 1}.$$

Для керування приводом використовуємо САК
зі структурною схемою згідно з рис. 2. Перехідні
процеси в САК без використання фільтра Калмана-
Бюсі та з його використанням за наявності збурюю-
чого впливу на об'єкт керування у вигляді білого
шуму зі спектральною щільністю $S_v(\omega) = 1$ та переда-
вальною функцією формувача $W_f(s) = 0,02$ наведено
на рис. 4. Дослідження показали, що фільтр Калма-
на-Бюсі виконує функцію оптимальної фільтрації та
забезпечує можливість досягнення необхідної якості
регулювання приводом, зокрема, помітно зменшує
тривалість перехідного процесу.

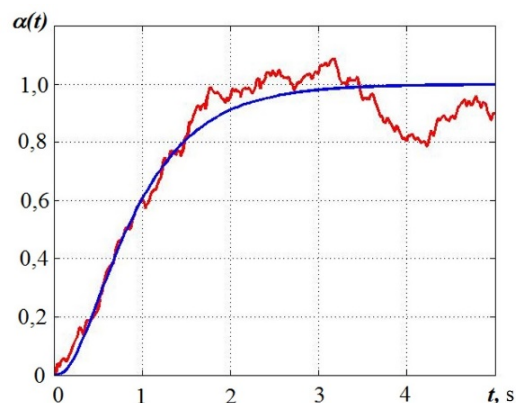


Рис. 4. Перехідний процес в САК

Висновки. Таким чином, розроблена інженерна
методика проектного розрахунку автоматичного
ЕГП обертального руху з об'ємним регулюванням,
що дозволяє по значенням максимального наван-
тажувального моменту та частоти обертання валу гі-
дромотора проводити оцінку основних параметрів та
вибір елементів і пристроїв приводу, прогнозувати
його статичні та динамічні характеристики. Відмін-
ною особливістю запропонованої методики є визна-
чення коефіцієнтів передач і постійних часу матема-
тичної моделі та побудова структурної схеми САК
приводом. Крім того, рекомендована САУ електрогі-
дравлічним приводом технологічного обладнання
враховує шум спостереження та стохастичне обу-
рення об'єкта керування.

Виконано приклад проектного розрахунку па-
раметрів автоматичного ЕГП технологічного облад-
нання для наступних вхідних даних: максимальний
навантажувальний момент $M_{\max} = 120$ Н·м; макси-

мальна частота обертання $n_{\max}=2100$ об/хв; приведений момент інерції частин, що обертаються, $J=0,8$ кг.м². Показана можливість використання в приводі аксіально-поршневого регульованого насоса з похилим диском, що серійно випускається, і нерегульованого гідромотора з похилою шайбою. На основі паспортних даних гідромашин визначено параметри математичної моделі приводу як об'єкта автоматичного керування. Для керування приводом використана САК, що враховує шум спостереження та стохастичне збурення об'єкта керування. Проведено дослідження динамічних характеристик системи, показано, що фільтр Калмана-Бюсі виконує функцію оптимальної фільтрації та забезпечує можливість досягнення необхідної якості регулювання приводом.

Л і т е р а т у р а

1. Пелевін Л.Є. Гідравліка, гідромашини та гідропневмоавтоматика/ Л.Є. Пелевін, Д.О. Мішук, В.П. Рашківський, С.В. Горбатюк, Г.О. Аржаєв, В.Ф. Красніков. К.: КНУБА, 2015. 340 с.
2. Свешников В.К. Станочные гидроприводы: справочник. Москва: Машиностроение, 2008. 640 с.
3. Krol, O., Sokolov, V., Tsankov, P.: Modeling of vertical spindle head for machining center. *Journal of Physics: Conference Series* 1553 012012 (2020).
4. Krol, O., Sokolov, V.: Modeling of Spindle Node Dynamics Using the Spectral Analysis Method. In: *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III*. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 1, pp. 35-44. Springer, Cham (2020).
5. Krol, O., Porkuian, O., Sokolov, V., Tsankov, P.: Vibration stability of spindle nodes in the zone of tool equipment optimal parameters. *Comptes rendus de l'Acadé'mie bulgare des Sciences* 72(11), 1546-1556 (2019).
6. Коваленко А. А., Соколов В.И., Уваров П.Е., Пазин В.В. Основы объемного гидравлического привода строительных и дорожных машин. Луганск: ДонГАСА, 1999. 137 с.
7. Sokolov, V., Porkuian, O., Krol, O., Stepanova, O.: Design Calculation of Automatic Rotary Motion Electrohydraulic Drive for Technological Equipment. In: *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV*. DSMIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 1, pp. 133-142. Springer, Cham (2021).
8. Krol, O., Sokolov, V.: Research of modified gear drive for multioperational machine with increased load capacity. *Diagnostyka* 21(3), 87-93 (2020).
9. Krol, O., Sokolov, V.: Research of toothed belt transmission with arched teeth. *Diagnostyka* 21(4), 15-22 (2020).
10. Sokolov, V., Porkuian, O., Krol, O., Baturin, Y.: Design Calculation of Electrohydraulic Servo Drive for Technological Equipment. In: *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III*. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 1, pp. 75-84. Springer, Cham (2020).
11. Sokolov, V.: Dynamics of Positioning Process for Hydraulic Drive Output Link by Distributor with Closed Center. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021)*. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham (2022).
12. Соколов В.І., Кроль О.С., Єпіфанова О.В. Дифузійні процеси в системах вентиляції. – Сєвєродонецьк: ЧНУ ім. В. Даля. 2018. 148 с.
13. Sokolov, V.: Diffusion of Circular Source in the Channels of Ventilation Systems. In: *Advances in Engineering Research and Application*. ICERA 2018. Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 63, pp. 278-283. Springer, Cham (2019).
14. Sokolov, V.: Increased Measurement Accuracy of Average Velocity for Turbulent Flows in Channels of Ventilation Systems. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020)*. Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 2, pp. 1182-1190. Springer, Cham (2021).
15. Sokolov, V.: Criteria Analysis of Diffusion Processes in Channels of Industrial Ventilation Systems. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021)*. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham (2022).
16. Соколов В.І., Кроль О.С., Єпіфанова О.В. Гідравліка. Сєвєродонецьк: ЧНУ ім. В. Даля, 2017. 160 с.
17. Коваленко А.А., Соколов В.И., Дымнич А.Х., Уваров П.Е. Основы технической механики жидкостей и газов: учебное пособие для вузов. Луганск: ВУГУ, 1998. 272 с.
18. Sokolov, V.: Transfer functions for shearing stress in non-stationary fluid friction. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019)*. ICIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 1, pp. 707-715. Springer, Cham (2020).
19. Sokolov, V.: Hydrodynamics of Flow in a Flat Slot with Boundary Change of Viscosity. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020)*. Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 2, pp. 1172-1181. Springer, Cham (2021).
20. Соколов В.І., Степанова О.Г., Батурін С.О. Дослідження динамічних характеристик електрогидравлічного приводу технологічного обладнання. Вісн. Східноукр. націон. ун-ту ім. В. Даля. 2019. № 1(249). С. 55-60.
21. Sokolov, V., Krol, O., Romanchenko, O., Kharlamov, Y., Baturin, Y.: Mathematical model for dynamic characteristics of automatic electrohydraulic drive for technological equipment. *Journal of Physics: Conference Series* 1553 012013 (2020).
22. Sokolov, V., Krol, O., Stepanova, O., Tsankov, P.: Dynamic characteristics of rotary motion electrohydraulic drive with volume regulation. *Comptes rendus de l'Acadé'mie bulgare des Sciences* 73(5), 691-702 (2020).
23. Sokolov V., Azarenko N., Sokolova Ya. Simulation of the power unit of the automatic electrohydraulic drive with volume regulation // *TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture*. Vol. 12. N 4. 2012. Lublin, Poland. pp. 268 - 273.
24. Соколов В.І. Розробка та дослідження системи автоматичного керування технологічним обладнанням з гідропроводом обертального руху / В.І. Соколов, О.Г. Степанова, Я.І. Степчук, Д.Ю. Кавун, М.К. Ткаченко // Вісн. Східноукр. націон. ун-ту ім. В. Даля. 2017. № 7 (237). С. 63-70.
25. Sokolova, Y., Tavanuk, T., Greshnoy, D.: Linear modeling of the electrohydraulic watching drive. *TEKA Comm. Mot. Energ. Agric.* XIB, 167-176 (2011).
26. Sokolov, V., Krol, O., Stepanova, O.: Automatic Control System for Electrohydraulic Drive of Production Equipment. 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE (2018).
27. Sokolov, V., Krol, O., Baturin, Y.: Dynamics Research and Automatic Control of Technological Equipment with Electrohydraulic Drive. 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE (2019).

28. Sokolov, V., Rasskazova, Y.: Automation of control processes of technological equipment with rotary hydraulic drive. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 2(2(80)), 44–50 (2016).

References

1. Pelevin L.Ye. *Gidravlika, gidromashyny ta gidropnevmavtomatyka*/ L.Ye. Pelevin, D.O. Mishuk, V.P. Rashkivskyj, Ye.V. Gorbatyuk, G.O. Arzhayev, V.F. Krasnikov. K.: KNUBA, 2015. 340 s.
2. Sveshnikov V.K. *Stanochnyye gidroprivody: spravochnik*. Moskva: Mashinostroenie, 2008. 640 s.
3. Krol, O., Sokolov, V., Tsankov, P.: Modeling of vertical spindle head for machining center. *Journal of Physics: Conference Series* 1553 012012 (2020).
4. Krol, O., Sokolov, V.: Modeling of Spindle Node Dynamics Using the Spectral Analysis Method. In: *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III*. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 1, pp. 35-44. Springer, Cham (2020).
5. Krol, O., Porkuian, O., Sokolov, V., Tsankov, P.: Vibration stability of spindle nodes in the zone of tool equipment optimal parameters. *Comptes rendus de l'Acad'emie bulgare des Sciences* 72(11), 1546-1556 (2019).
6. Kovalenko A. A., Sokolov V.I., Uvarov P.E., Pazin V.V. *Osnovyi ob'emnogo gidravlicheskogo privoda stroitelnykh i dorozhnykh mashin*. Lugansk: DonGASA. 1999. 137 s.
7. Sokolov, V., Porkuian, O., Krol, O., Stepanova, O.: Design Calculation of Automatic Rotary Motion Electrohydraulic Drive for Technological Equipment. In: *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV*. DSMIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 1, pp. 133-142. Springer, Cham (2021).
8. Krol, O., Sokolov, V.: Research of modified gear drive for multioperational machine with increased load capacity. *Diagnostyka* 21(3), 87-93 (2020).
9. Krol, O., Sokolov, V.: Research of toothed belt transmission with arched teeth. *Diagnostyka* 21(4), 15-22 (2020).
10. Sokolov, V., Porkuian, O., Krol, O., Baturin, Y.: Design Calculation of Electrohydraulic Servo Drive for Technological Equipment. In: *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III*. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 1, pp. 75-84. Springer, Cham (2020).
11. Sokolov, V.: Dynamics of Positioning Process for Hydraulic Drive Output Link by Distributor with Closed Center. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021)*. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham (2022).
12. Sokolov V., Krol O., Yepifanova O. Diffusion processes in ventilation systems. V. Dahl EUNU, Severodonetsk, 2018.
13. Sokolov, V.: Diffusion of Circular Source in the Channels of Ventilation Systems. In: *Advances in Engineering Research and Application*. ICERA 2018. Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 63, pp. 278-283. Springer, Cham (2019).
14. Sokolov, V.: Increased Measurement Accuracy of Average Velocity for Turbulent Flows in Channels of Ventilation Systems. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020)*. Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 2, pp. 1182-1190. Springer, Cham (2021).
15. Sokolov, V.: Criteria Analysis of Diffusion Processes in Channels of Industrial Ventilation Systems. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021)*. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham (2022).
16. Sokolov V., Krol O., Yepifanova O. *Hydraulics*. Severodonetsk: V. Dahl EUNU, 2017. 160 s.
17. Kovalenko A.A. *Osnovy tehnikeskoy mehaniki zhidkostey i gazov: uchebnoe posobie dlja vuzov*/ A.A. Kovalenko, V.I. Sokolov, A.H. Dymnich, P.E. Uvarov. Lugansk: VUGU, 1998. 272 s.
18. Sokolov, V.: Transfer functions for shearing stress in non-stationary fluid friction. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019)*. ICIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 1, pp. 707-715. Springer, Cham (2020).
19. Sokolov, V.: Hydrodynamics of Flow in a Flat Slot with Boundary Change of Viscosity. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020)*. Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 2, pp. 1172-1181. Springer, Cham (2021).
20. Sokolov V.I., Stepanova O.G., Baturin C.O. *Doslidzhennya dinamichnih charakteristik elektrogidravlichnogo privodu tekhnologichnogo obladnannya*. Visn. Skhidnoukr. natsion. un-tu im. V. Dalia. 2019. № 1(249). S. 55-60.
21. Sokolov, V., Krol, O., Romanchenko, O., Kharlamov, Y., Baturin, Y.: Mathematical model for dynamic characteristics of automatic electrohydraulic drive for technological equipment. *Journal of Physics: Conference Series* 1553 012013 (2020).
22. Sokolov, V., Krol, O., Stepanova, O., Tsankov, P.: Dynamic characteristics of rotary motion electrohydraulic drive with volume regulation. *Comptes rendus de l'Acad'emie bulgare des Sciences* 73(5), 691-702 (2020).
23. Sokolov V., Azarenko N., Sokolova Ya. Simulation of the power unit of the automatic electrohydraulic drive with volume regulation // *TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture*. Vol. 12. N 4. 2012. Lublin, Poland. pp. 268 - 273.
24. Sokolov V.I. *Rozrobka ta doslidzhennia systemy avtomatychnoho keruvannia tekhnolohichnym obladnanniam z hidropryvodom obertalnoho rukhu* / V.I. Sokolov, O.H. Stepanova, Ya.I. Stepchuk, D.Iu. Kavun, M.K. Tkachenko // Visn. Skhidnoukr. natsion. un-tu im. V. Dalia. - 2017. - № 7 (237). - S. 63-70.
25. Sokolova, Y., Tavanuk, T., Greshnoy, D.: Linear modeling of the electrohydraulic watching drive. *TEKA Comm. Mot. Energ. Agric. XIB*, 167–176 (2011).
26. Sokolov, V., Krol, O., Stepanova, O.: Automatic Control System for Electrohydraulic Drive of Production Equipment. 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE (2018).
27. Sokolov, V., Krol, O., Baturin, Y.: Dynamics Research and Automatic Control of Technological Equipment with Electrohydraulic Drive. 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE (2019).
28. Sokolov, V., Rasskazova, Y.: Automation of control processes of technological equipment with rotary hydraulic drive. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 2(2(80)), 44–50 (2016).

Golubenko O.L., Romanchenko O.V., Sokolov V.I., Stepanova O.G. Method of design calculation for automatic electrohydraulic drive of rotary motion and volume regulation

The article is devoted to the development of automatic electrohydraulic drives for technological equipment. The engineering method of design calculation for automatic electrohydraulic drive of rotary motion and volume regulation is presented. The engineering method of design calculation allows to evaluate the main parameters and choose drive elements and devices using the maximum load moment and hydraulic motor rotation velocity, predict its static and dynamic characteristics. The following parameters are accepted as input data for calculation of the hydraulic drive with rotational motion: M_{max} – maximum load moment; n_{max} – maximum rotation frequency; J – reduced inertia moment the rotor. Volumetric hydraulic drive with adjustable pump and unregulated hydraulic motor is the most common. Hydraulic drives with this structure are used in many types of equipment and provide smooth start-up and stepless regulation for the working body speed of equipment with a single control element. The working fluid is selected based on the technical requirements for equipment or recommendations from the technical data of the main hydraulic equipment - pump and hydraulic motor, as well as taking into account the mode of operation of electrohydraulic drive process equipment, climatic and temperature conditions. The automatic control system by electrohydraulic drive is proposed, that taking into account observation noise and stochastic perturbation of the control object. The example of design calculation for the parameters of automatic electrohydraulic drive for technological equipment for the following input data has been performed: maximum load moment $M_{max} = 120 \text{ N}$ maximum rotation frequency $n_{max} = 2100 \text{ rpm}$; reduced inertia moment of the rotating parts $J = 0,8 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. The

possibility of using serially produced axial piston regulated pump with inclined disk and unregulated hydraulic motor with an inclined washer is shown. Based on the passport data of hydraulic machines, the parameters of the mathematical model for the drive as object of automatic control are determined. The research of the system dynamic characteristics is carried out.

Keywords: mechanical engineering, railway transport, engineering method, electrohydraulic drive, volume regulation, automatic control system, transfer function, dynamic characteristics.

Голубенко Олександр Леонідович – д.т.н., проф., професор кафедри залізничного транспорту, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк), olgol@snu.edu.ua

Романченко Олексій Володимирович – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк) alexvromanchenko@snu.edu.ua

Соколов Володимир Ілліч – д.т.н., проф., завідувач кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк) sokolov@snu.edu.ua

Степанова Оксана Геннадіївна – PhD, старший викладач кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк) ogstepanova@snu.edu.ua

Стаття подана 01.02.2022 р.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-272-2-23-28>

UDK 004.92[621:744]

SPATIAL THINKING OF STUDENTS WHEN STUDYING GRAPHIC DISCIPLINES

Karpyuk L.V., Davydenko N.O.

ПРОСТОРОВЕ МИСЛЕННЯ СТУДЕНТІВ ПРИ ВИВЧЕННІ ГРАФІЧНИХ ДИСЦИПЛІН

Карпюк Л.В., Давіденко Н.О.

The article examines the problems that students face when studying graphic disciplines. At present, the task of further improving the quality of professional training of students has been set as the most important task for higher and secondary specialized institutions. This involves broad-based training of future specialists and the complex nature of mastering modern theoretical and applied knowledge, the ability to apply the knowledge gained in practice, possession of the necessary skills in a related field. A specialist with a higher education, but without knowledge and skills to receive and process graphic information, may turn out to be incompetent in professional activities. The preparedness of students for graphic activity is determined by the complex of knowledge acquired by them in the learning process, skills of reproductive and creative activity, which in the future determine their successful professional activity. A future engineer must have a high level of general and technical intelligence, well-developed spatial thinking, and have a high level of theoretical knowledge in the field of professional activity. In the system of training specialists for engineering specialties, one of the main places is occupied by the academic disciplines «Engineering Graphics» and «Descriptive Geometry». They contribute to the development of the future engineer of spatial representation, logical and constructive thinking, the ability to analyze and synthesize. Well-developed spatial awareness and imagination are prerequisites for successful learning in many academic disciplines. And the disciplines «Descriptive geometry» and «Engineering graphics» by their content make high demands on the level of development of spatial representations. This article reveals the reasons for the weak development of spatial representations among first-year students of universities. It is proposed to use the developed approach, including tasks, methods and system of exercises, tasks and tests, as one of the ways to successfully develop spatial representations in the study of graphic disciplines. Each group of exercises of this system is aimed at the conscious and active work of students and solves a specific problem arising from the theoretical foundations of the development of spatial representations.

Key words: thinking, graphic disciplines, spatial representation, exercises, educational process, methods of didactics, analysis, synthesis.

Introduction. Higher education in the context of the need for constant self-improvement of specialists is aimed at the formation of a professionally active personality with a holistic system of knowledge and practice-oriented methods in their field of activity. Therefore, the education system has a great responsibility for organizing the educational process that ensures the intellectual development of students.

The specific features of applied geometry as a science and as an academic discipline determine its special position among the basic directions of personality development. Mastering the system of scientific knowledge, effective work in many types of theoretical and practical human activity are inextricably linked with the ability to operate with spatial images, that is, with developed intellectual skills.

In the system of training specialists in engineering specialties, one of the main places is occupied by the disciplines «Engineering Graphics» and «Descriptive Geometry». They contribute to the development of a future engineer's spatial representation, logical and constructive thinking, abilities for analysis and synthesis. Well-developed spatial representation and imagination are necessary conditions for the successful assimilation of many academic disciplines.

In addition, engineering graphics is the language of technical communication, a tool for transmitting design information. Through graphic activity, such cognitive processes as feeling, assistance, representation are realized simultaneously. The development of spatial representation is of exceptional importance, because the development of representation, especially visual-figurative and spatial representation, is closely connected with the human intellect.

The main problem of graphic training of engineers at a technical university at present is the discrepancy between the requirements of the state educational standard and the actual volume of classroom hours provided for by the curriculum. Independent work does

not give the desired results: the topics proposed for study are not sufficiently studied by students. Pre-university graphic training is practically absent. All this leads to the fact that most students in solving graphic problems operate with flat, rather than spatial images.

Presentation of the main material. The experience of teaching graphic disciplines shows that the majority of applicants have very poorly developed spatial representations [1, 2], and some applicants do not have it at all. One of the reasons for this is the absence of the “Drafting” subject in many secondary schools or the reduction in the number of hours in this subject.

Undoubtedly, the accumulated experience of students in their representation of the objects shape is also of great importance. They could receive it in the lessons of drawing, geometry, stereometry, geography, physics, chemistry, labor training, etc., Each of these subjects has its own possibilities in the development of spatial representations, therefore, the organization, conduct and pedagogical management of them are of decisive importance, starting from the first year of schooling.

First-year students at the university cannot correctly examine and recognize the geometric bodies that make up the technical detail. At the same time, they experience the greatest difficulty in the case of finding an object in an unusual position for them. Often, students do not notice some elements of details (holes, grooves, chamfers, ribs, etc.), they cannot grasp the general shape of the object, i.e. recognize in it a certain combination of geometric bodies. In addition, many students are not able to mentally move from a visual image to a complex drawing (plot) and vice versa. And with an insufficiently developed spatial representation, it is difficult for students to fully express anything graphically [3].

To eliminate these shortcomings, it is proposed to use the developed didactic approach in the study of graphic disciplines (Fig. 1) [4].

An important place in the developed approach is occupied by such methods of didactics as analysis and synthesis. Analysis allows you to recreate the spatial form of a complex object in parts and thereby simplifies the presentation process itself. The analysis is followed by synthesis. It's bringing together the characteristic features of the object and obtaining a generalized image on their basis.

It is known that spatial representations can be developed in two ways: induction and deduction [5].

The first method involves an initial acquaintance with the spatial properties of the basic geometric bodies, and then, on this basis, a transition to the study of complex spatial forms, which are a combination of geometric bodies. Thus, the process of cognition proceeds in accordance with well-known didactic rules: from the simple to the complex, from the known to the unknown.

The second method involves the selection by analysis of objects of complex shapes of individual geometric bodies, the shape of which should be considered. In this case, the bodies from which the shape of the object is created are not isolated, therefore,

their shape is not fully captured due to uncertainty [6]. Therefore, the ability to mentally divide the shape of a complex object into simple geometric bodies is the main skill in the representation of the form, which must be used in the development of spatial representations.

To form spatial representations in the course of studying graphic disciplines, it is necessary to solve the following tasks:

- to develop in students the ability to clearly reproduce mentally the shape of geometric bodies known to them or real objects when constructing and reading machine-building and construction drawings;
- expand the boundaries of spatial representations, consolidate and bring them into a certain system.

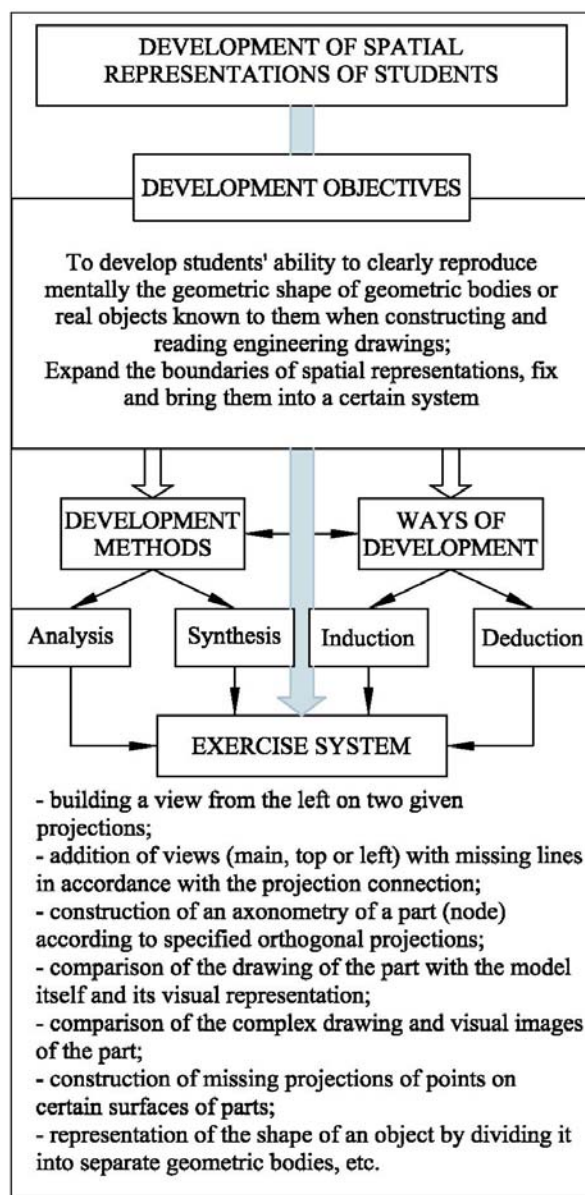


Fig. 1. Didactic approach to the development of spatial representations of students in the study of graphic disciplines

One of the ways to successfully solve these problems in the study of graphic disciplines is the

proposed system, which includes several groups of exercises, tasks and tests.

In this system, teachers should pay great attention to the selection of tasks. When studying any new section, for illustration, you first need to use drawings that show objects that are simple in form and well known to students. Gradually, the tasks should become more difficult. As the studied material is assimilated, it is advisable to move on to individual tasks [7-8]. For this purpose, a variety of tasks with the necessary number of options are offered.

When creating a system of exercises, it is proposed to be guided by the rule according to which exercises of each type solve a specific problem arising from the theoretical foundations for the development of spatial representations.

The first group of exercises is building a view on the left according to two given projections (Fig. 2). These exercises contribute to the development of students' skills aimed at representing the form of the object as a whole and its individual parts in two types. They can get more difficult as you gain skills.

The second group of exercises is the addition of views (main, top or left) with missing lines in accordance with the projection connection. According to the unfinished drawing, students find it difficult to determine the shape of objects. Therefore, there should not be too many missing lines so that they can solve the problem. These exercises can be practiced both independently and as an integral part of other exercises (see Fig. 2).

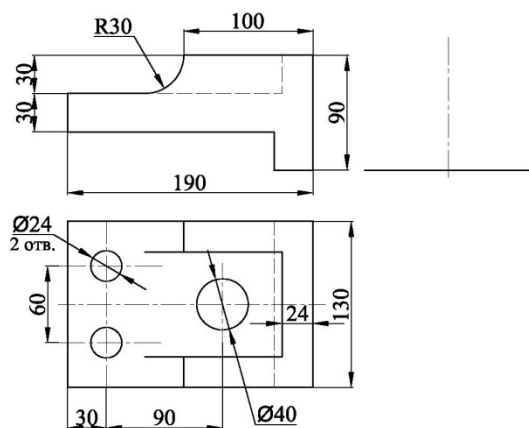


Fig. 2. Example exercise: complete the front view and the missing left view. Make the necessary cuts

The third group of exercises is building an axonometry of a part (assembly) according to given orthogonal projections (Fig. 3). It is a more difficult task for a student, since it requires reproducing the shape of an object according to its projections. The value of this exercise lies in the fact that after performing a visual image, the student more clearly imagines the shape of the object (node) depicted in the drawing. Such exercises contribute to the formation in the minds of students of certain connections between flat and three-

dimensional images and, consequently, the development of spatial representations.

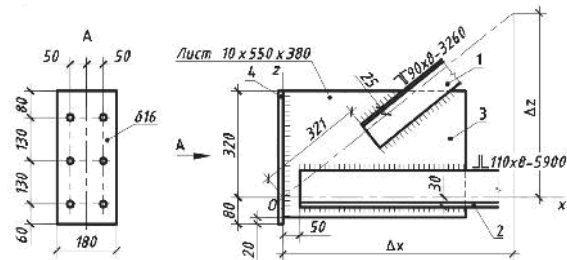


Fig. 3. Example exercise. To construct a rectangular isometry of node 1

The fourth group of exercises is a comparison of the detail drawing with the model itself and its visual representation. The student must find among a certain number of models of the part the one shown in the drawing. In this case, the shapes of the models differ only slightly from the shape of the depicted part. Such exercises develop skills in highlighting the most characteristic features of the shape of objects in the analysis, memorizing them and comparing them with the image. This group of exercises also includes tasks for finding a given part from visual images of a drawing.

The fifth group of exercises is a comparison of a complex drawing and visual images of a part with fixing the attention of students on individual elements of the subject. For example, students are given a visual representation of an object and its three types. Each face in the visual image is indicated by a letter or number. It is required to designate the corresponding planes on three projections. This group includes tasks, for the solution of which it is necessary to apply dimensions taken from a visual image or vice versa on three types of parts.

The sixth group of exercises is the construction of the missing projections of points given on certain surfaces of parts. When solving such problems, students determine the projections of the faces on which the given points are located. Gradually, from points, you can move on to segments, flat figures.

The seventh group of exercises is the representation of the shape of an object by dividing it into separate geometric bodies. For example, the student must name the geometric bodies that make up the object; indicate their boundaries on the proposed views of the detail drawing or show the boundaries of the details on the assembly drawing.

Teachers of technical universities should use pedagogical techniques to develop students' spatial imagination and thinking, the ability to see spatial images, combine them when solving various design problems.

In this regard, we will consider two approaches in the development of modern graphic disciplines.

The traditional approach is based on the development and creation of a product drawing, while the computer is used as an electronic drawing board,

which improves the quality of design documentation and speeds up the design process itself.

The main place in this approach is occupied by the drawing of the model, which serves as a means of its presentation. The product drawing contains information for solving various geometric and technical problems, and also serves as the basis for further manufacturing and operation of the product (Fig. 4). In the traditional approach to design, reference, design and technological documentation is the basis for the transfer of information.

The basis of **the innovative approach** is a three-dimensional model of the product (Fig. 5). Visualization capabilities make it more visual, and tools are added to solve engineering problems in an automated mode.

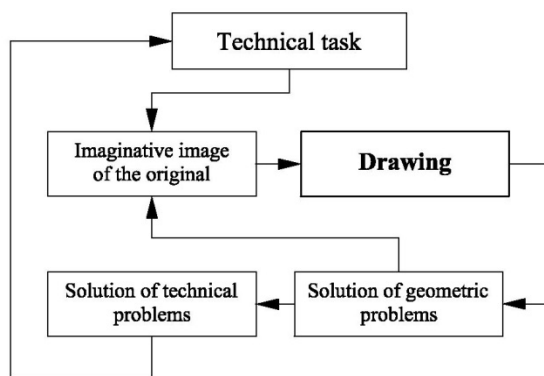


Fig. 4. Traditional approach

A three-dimensional model of an object (product), containing information about the geometry of the object, is used to obtain a drawing, as well as to calculate various characteristics of the object and technological parameters during manufacture. Methods for creating a drawing are based on the capabilities of computer graphics and methods for transforming a spatial model.

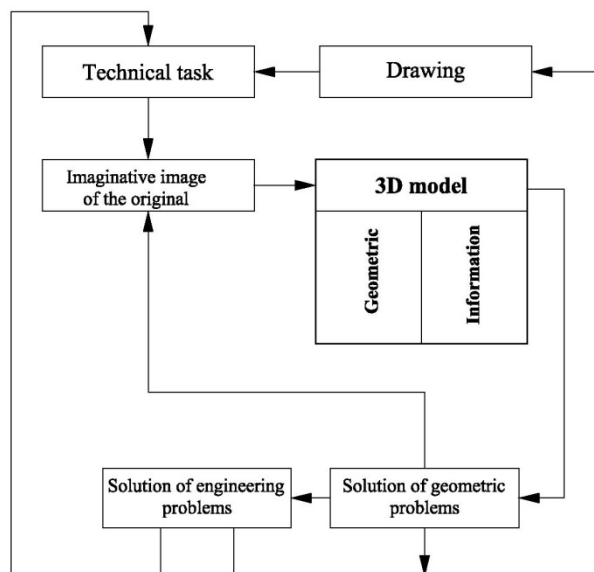


Fig. 5. Innovative approach

In an innovative approach, the transfer of information about models of geometric objects occurs on the basis of a computer representation of objects. The use of computer technologies in the educational process forms an information-graphic culture, develops the ability of design activities. The effectiveness of the use of these technologies does not cause doubts. The solution to problems in the study of graphic disciplines is the restructuring of the entire course using 3D modeling methods from the very beginning of training. The main emphasis in this approach is on the analysis of geometric shapes.

At the initial stage of training, there will be a study of 3D modeling: the construction of three-dimensional solid and surface objects and their orthogonal projections (the system allows you to make these constructions automatically). The experience of teaching modeling shows the need to perform special exercises “from simple to complex”. At the same time, the student must be able to imagine a detail as a complex of its constituent elements. The task of the teacher is not only to help the student understand and master the logic of modeling, but also to form the skills of constructive analysis of the shape of the part. The student studies the ways of shaping, masters editing operations to create a model. In the classical course of descriptive geometry, it is proposed to replace the solution of similar positional, metric problems with 3D modeling technologies. Consideration of such topics as surfaces, methods of their formation, section of a surface by a plane, section of surfaces, study of the nature of the section line depending on the relative sizes of surfaces, axonometric projections, which can be represented using 3D modeling [9-10].

Conclusions. The study of graphic disciplines allows to depict objects, to develop spatial and logical thinking. Methods of teaching descriptive geometry and engineering graphics, which have been practiced for decades, are ineffective in changing living conditions.

Therefore, using the proposed types of exercises in the educational process, we can conclude that students, considering a technical detail or a node in the form of a combination of geometric bodies and individual elements, learn analysis as a research method and thereby improve their spatial representations.

If possible, it is advisable to start with the analysis of simple parts and assemblies, gradually moving on to more complex ones. In addition to lectures, practical exercises, these exercises can be used to check the quality of mastering certain topics of the discipline, defending settlement and graphic works, and compiling test tasks for intermediate certification.

Should also be taken into account that the formation of a geometric model is a stage that determines the further process of solving engineering problems, which is becoming more and more automated. Such a graphic preparation technique will reflect the trends of computer-aided design and meet the requirements for modern engineers.

Quantitative and qualitative indicators of the results of the work done indicate that the integration of computer graphics into graphic disciplines is relevant and interesting. Revealing the scope of tasks in the relationship between traditional and innovative technologies in design, we get the opportunity to move on to building distance learning systems. The latter is of particular importance in the formation of systematic geometric thinking. Traditional and innovative approaches should be mastered in conjunction, taking into account their joint development.

The use of this technique contributes to the development of the necessary spatial representations in students. All this enhances the culture of geometric and graphic training of students, thereby creating the necessary basis for further study of graphic disciplines.

References

1. Chopova N.V. Razrabotka sistemi uprazhnenii dlya razvitiya prostranstvennih predstavlenii studentov na zanyatiyah po inzhenernoi grafike. *Nauka i sovremennost*. 2010. № 2–2. Pp. 112–116.
2. Seabra R.D., Santos E.T. Developing the spatial visualization ability with a virtual reality tool for teaching descriptive geometry: A brazilian experience. *Journal for Geometry and Graphics*. 2013. No. 17 (1). Pp. 101–117.
3. Ernst J.V., Lane D., Clark A.C. Pictorial visual rotation ability of engineering design graphics students. *Engineering Design Graphics Journal*. 2015. No. 79 (1). Pp. 1–13.
4. Cvirkun L.O. Didaktichni pidhodi ta principy formuvannya proektno-konstruktorskoyi kompetentnosti u procesi vivchennya grafichnih disciplin. *Pedagogika vish'oyi ta serednoyi shkoli*. 2015. Vip. 44. Pp. 295–300.
5. Kushnarova N.M., Povechera I.V., Lyahovec G.M. Zastosuvannya program komp'yuternoyi grafiki na urokah tehnologii z metoyu vizualizatsiyi navchalnogo materialu. *Visnik Nacionalnogo universitetu «Chernigivskii kolegium» imeni T.G. Shevchenka. Seriya: Pedagogichni nauki*. 2019. Vip. 2. Pp. 142–148.
6. Gordon V.O., Semencov-Ogievskii M.A. Kurs nachertatelnoi geometrii: Uchebn. posobie dlya vtuzov / Pod red. V.O. Gordona i Yu.B. Ivanova. 24-e izd., ster. M.: Vissh. shk., 2000. 272 p.
7. Kondrateva T.M., Borisova A.Yu. Nachertatel'naya geometriya i inzhenernaya grafika: sb. zadach dlya studentov zaочноi formi obucheniya. Razdeli 1, 2. M.: MGSU, 2013. 61 p.
8. Chen Y.C., Chi H.L., Hung W.H., Kang S.C. Use of tangible and augmented reality models in engineering graphics courses. *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*. 2011. No. 137 (4). Pp. 267–276.
9. Strel'nikov V.Yu., Britchenko I.G. Suchasni tehnologii navchannya u vish'ii shkoli: modulnii posibnik dlya sluhachiv avtorskikh kursiv pidvishchennya kvalifikatsiyi vkladachiv MIPK PUET. Poltava. 2013. 309 p.
10. Karpyuk L.V., Davydenko N.O. Modeling in AutoCAD for bachelors. *Bicnik Skhidnoukr. nac. un-tu im. V. Dalya*. 2020. № 1 (265). Pp. 25–28

Література

1. Чопова Н.В. Разработка системы упражнений для развития пространственных представлений студентов на занятиях по инженерной графике. *Наука и современность*. 2010. № 2–2. С. 112–116.
2. Seabra R.D., Santos E.T. Developing the spatial visualization ability with a virtual reality tool for teaching descriptive geometry: A brazilian experience. *Journal for Geometry and Graphics*. 2013. No. 17 (1). Pp. 101–117.
3. Ernst J.V., Lane D., Clark A.C. Pictorial visual rotation ability of engineering design graphics students. *Engineering Design Graphics Journal*. 2015. No. 79 (1). Pp. 1–13.
4. Цвіркун Л.О. Дидактичні підходи та принципи формування проєктно-конструкторської компетентності у процесі вивчення графічних дисциплін. *Педагогіка вищої та середньої школи*. 2015. Вип. 44. С. 295–300.
5. Кушнарєва Н.М., І.В. Повечера, Г.М. Ляховець. Застосування програм комп'ютерної графіки на уроках технологій з метою візуалізації навчального матеріалу. *Вісник Національного університету «Чернігівський колегіум» імені Т. Г. Шевченка. Серія: Педагогічні науки*. 2019. Вип. 2. С. 142–148.
6. Гордон В.О., Семенов-Огиевский М.А. Курс начертательной геометрии: Учебн. пособие для втузов / Под ред. В.О. Гордона и Ю.Б. Иванова. – 24-е изд., стер. М.: Высш. шк., 2000. – 272 с.
7. Кондратьева Т.М., Борисова А.Ю. Начертательная геометрия и инженерная графика: сб. задач для студентов заочной формы обучения. Разделы 1, 2. М.: МГСУ, 2013. 61 с.
8. Chen Y.C., Chi H.L., Hung W.H., Kang S.C. Use of tangible and augmented reality models in engineering graphics courses. *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*. 2011. No. 137 (4). Pp. 267–276.
9. Стрельников В.Ю., Брітченко І.Г. Сучасні технології навчання у вищій школі: модульний посібник для слухачів авторських курсів підвищення кваліфікації викладачів МІПК ПУЕТ. Полтава. 2013. 309 с.
10. Karpyuk L.V., Davydenko N.O. Modeling in AutoCAD for bachelors. *Вісник Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля*. 2020. № 1 (265). С. 25–28

Карпюк Л.В., Давіденко Н.О. Просторове мислення студентів при вивченні графічних дисциплін

У статті розглядаються проблеми, які виникають у студентів при вивченні графічних дисциплін. В даний час найважливішою задачею перед вищими і середніми спеціальними закладами є завдання подальшого підвищення якості професійної підготовки студентів. Це передбачає широкопрофільну підготовку майбутніх фахівців та комплексний характер оволодіння сучасними теоретичними та прикладними знаннями, уміння застосовувати отримані знання на практиці, володіння необхідними навичками у суміжній галузі. Фахівець із вищою освітою, але без знань та навичок отримувати та обробляти графічну інформацію, може виявитися некомпетентним у професійній діяльності. Підготовленість студентів до графічної діяльності визначається комплексом набутих ними у процесі навчання знань, умінь репродуктивної та творчої діяльності, які у майбутньому визначають їх успішну професійну діяльність. Майбутній інженер повинен мати високий рівень загального і технічного інтелекту, добре розвинене просторове мислення, мати високий рівень теоретичних знань у сфері професійної діяльності.

У системі підготовки фахівців інженерних спеціальностей одне з основних місць займають навчальні дисципліни «Інженерна графіка» та «Нарисна геометрія». Вони сприяють розвитку у майбутнього інженера просторового уявлення, логічного та конструктивного мислення, здібностей до аналізу та синтезу. Добре розвинене просторове уявлення та уява є необхідними умовами успішного засвоєння багатьох навчальних дисциплін. А дисципліни «Нарисна геометрія» та «Інженерна графіка» своїм змістом висувають високі вимоги до рівня розвитку просторових уявлень. У статті розкрито причини слабого розвитку просторових уявлень у студентів першого курсу вузів. Пропонується використовувати як один із шляхів успішного розвитку просторових уявлень при вивченні графічних дисциплін розроблений підхід, що включає завдання, методи, способи та систему вправ, завдань і тестів. Кожна група вправ цієї системи спрямована на свідому та активну роботу студентів і вирішує певне за-

вдання, що впливає з теоретичних основ розвитку просторових уявлень.

Ключові слова: мислення, графічні дисципліни, просторове уявлення, вправи, навчальний процес, методи дидактики, аналіз, синтез.

Карпюк Людмила Вікторівна, старший викладач кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк), karp224klv@ukr.net

Давіденко Наталія Олександрівна, старший викладач кафедри іноземних мов та професійної комунікації, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк), nat.davidenko11@gmail.com

Стаття подана 16.01.2022 р.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-272-2-29-35>

УДК 621.952.5

ДОСЛІДЖЕННЯ КОМПОНОВОК КОРОБОК ШВИДКОСТЕЙ МЕТАЛОРІЗАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ МЕТОДОМ ПАРАМЕТРИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Кроль О.С., Алієв В.Е.

RESEARCH OF SPEED BOX LAYOUTS OF METAL-CUTTING MACHINES BY PARAMETRIC MODELING METHOD

Krol O.S., Aliev V.E.

Розглянуто методики побудови та моделювання поперечних конфігурацій багатоопераційного токарно-гвинторізного верстата за допомогою методів параметричного моделювання. Пропонується розглядати задачу синтезу просторового компоновання приводу головного руху токарного верстата (редуктора) як двокритеріальну оптимізаційну задачу. Існують два основних критерії ефективності конструкційного завдання для поперечної компоновки: 1) максимізувати жорсткість вихідного валу редуктора та шпинделя верстата; 2) мінімізувати навантаження на передню опору шпинделя. Досліджено вплив критеріїв оптимізації на проектні рішення при розробці компоновальних рішень робочого простору машини. Розроблено алгоритми та програми параметричного представлення багатоступеневих редукторів у середовищі інтегрованої системи автоматизованого проектування АРМ «WinMachine». Показано ефективність застосування синтаксису параметризації в задачах геометричного аналізу та синтезу просторового положення валів і зубчастих коліс для редукторів металорізального обладнання. Показано ефективність використання інтерфейсу модуля АРМ Graph при виникненні ненормативних ситуацій, пов'язаних із порушенням мінімально допустимої відстані зовнішньої поверхні шестерень до бічної стінки корпусу та днища корпусу коробки передач. Розглянуто особливості застосування засобів параметризації, пов'язаних із використанням спеціалізованої бази даних проектування середовища автоматизованої системи проектування АРМ WinMachine. Дано оцінку різниці між заводським варіантом та отриманим варіантом за критерієм оптимальної жорсткості. Для цього було використано модуль розрахунку АРМ Shaft та розраховано максимальний прогин стріли переднього кінця шпинделя у двох вищезгаданих варіантах. Відзначено ефективність застосування розділу бази даних, який функціонує як із традиційними графічними примітивами, так і зі структурними елементами в параметричному поданні. Запропоновано розв'язання двокритеріальної задачі проектування редуктора токарного верстата за критеріями максимальної жорсткості та мінімального навантаження на передню опору вала.

Ключові слова: просторове компоновання, привід головного руху, токарний верстат, параметрична модель, критерії оптимізації.

Вступ. Для всієї різноманітності верстатів певної групи (типу) неможливо використовувати одну-дві конструкції коробок швидкостей (КШ). Найчастіше доводиться розробляти нову конструкцію, застосовуючи методи структурної оптимізації, або створювати новий варіант вже відомої конструкції-прототипу за допомогою методу параметричної оптимізації.

Ефективність проектування КС залежить від прийнятого поперечного компоновання (згортки), у тому числі від положення вихідного валу. У існуючих роботах з проектування згорток КШ [1-3] не вводяться методика та алгоритм побудови ефективного варіанту конструкції коробки за критеріями жорсткості та надійності.

При визначенні просторового положення зубчастих коліс, що передають крутний момент на шпиндель верстата, необхідно враховувати дві взаємовиключні ситуації:

1. Паралельність та односпрямованість сили різання R та результуючої сили Q у зубчастому зачепленні «Вихідний вал – шпиндель», які забезпечують максимальну жорсткість шпиндельного вузла (мінімальний прогин переднього кінця шпинделя). Такий варіант використовують у верстатах для чистових методів обробки.

2. Паралельність і спрямованість в протилежні сторони сил R і Q забезпечує найменше навантаження на передню опору (як найбільш навантажену в процесі роботи верстата).

Багато варіантів конструктивних виконань деталей КШ [4, 5] та їх взаємного розташування з одного боку, а також необхідність підвищення продуктивності праці проектувальника з іншого робить ефективним використання апарату параметричного моделювання [6-8]. Саме цей механізм, що дозволяє зменшити час розробки нової чи модифікації відомої конструкції, реалізований у всіх сучасних САПР [9-11].

Метою роботи. Розробка такої параметричної моделі поперечного компонування КШ, яка забезпечить в одному варіанті максимальну жорсткість проектного верстата (його шпиндельного вузла), а в іншому варіанті наведене мінімальне навантаження на передню опору шпинделя.

Основний матеріал. Механізм параметризації характеризується наявністю взаємозв'язків та обмежень між геометричними об'єктами, що становлять цю конструкцію (на відміну від непараметричного). У цьому частині зазначених взаємозв'язків і обмежень може формуватися автоматично під час введення графічної інформації, інші ж призначатися користувачем самостійно.

Досить ефективно механізм параметризації реалізований в сучасній CAD CAM CAE PDM системі автоматизованого проектування APM WinMachine, розробленої в НТЦ АПМ [12-15].

У цих роботах розроблено процедуру побудови параметричних моделей поперечних компоновок коробок передач металорізальних верстатів. Проектне завдання формується так: розробити таку параметричну модель поперечного компонування КС, яка забезпечить в одному варіанті максимальну жорсткість проектного верстата (його шпиндельного вузла), а в іншому варіанті наведене мінімальне навантаження на передню опору шпинделя.

Відомий алгоритм проектування компоувальних схем будується у наступній послідовності: 1) проводяться осі валів; 2) визначаються конструктивні елементи деталей, що розташовані на валах; 3) проставляються осьові розміри всіх конструктивних елементів; 4) викреслюється згортка коробки швидкостей, по якій будуть визначатися кути розташування зубчастих пар, напрямки окружних та радіальних зусиль тощо.

Для вдосконалення наведеного вище алгоритму пропонується параметрична модель структурного синтезу просторового компонування КШ [16, 17]. Як об'єкт проектування обраний верстат багатоцільової малогабаритної моделі МС-03, який призначений для механічної обробки металів (струменням, нарізанням різьблення, фрезеруванням, свердлінням розточуванням та шліфуванням). У першому варіанті використовується критерій максимальної жорсткості (Рис. 1,а), який реалізується за умови паралельності та односпрямованості сил R і Q [18].

Механізм параметризації характеризується наявністю взаємозв'язків та обмежень між геометричними об'єктами, що становлять цю конструкцію (на відміну від непараметричного). У цьому частині зазначених взаємозв'язків і обмежень може формуватися автоматично під час введення графічної інформації, інші ж призначатися користувачем самостійно.

Досить ефективно механізм параметризації реалізований в сучасній CAD CAM CAE PDM системі автоматизованого проектування APM WinMachine, розробленої в НТЦ АПМ [19-22].

У цих роботах розроблено процедуру побудови параметричних моделей поперечних компоновок коробок передач металорізальних верстатів. Проектне завдання формується так: розробити таку параметричну модель поперечного компонування КС, яка забезпечить в одному варіанті максимальну жорсткість проектного верстата (його шпиндельного вузла), а в іншому варіанті наведене мінімальне навантаження на передню опору шпинделя.

Відомий алгоритм проектування компоувальних схем будується у наступній послідовності: 1) проводяться осі валів; 2) визначаються конструктивні елементи деталей, що розташовані на валах; 3) проставляються осьові розміри всіх конструктивних елементів; 4) викреслюється згортка коробки швидкостей, по якій будуть визначатися кути розташування зубчастих пар, напрямки окружних та радіальних зусиль тощо.

Для вдосконалення наведеного вище алгоритму пропонується параметрична модель структурного синтезу просторового компонування КШ. Як об'єкт проектування обраний верстат багатоцільової малогабаритної моделі МС-03, який призначений для механічної обробки металів (нарізанням різьблення, фрезеруванням, свердлінням розточуванням та шліфуванням). У першому варіанті використовується критерій максимальної жорсткості (Рис. 1), який реалізується за умови паралельності та односпрямованості сил R і Q . У другому варіанті використовується критерій мінімального навантаження (Рис. 2), який реалізується за умови паралельності та спрямованості в протилежні сторони сил R і Q .

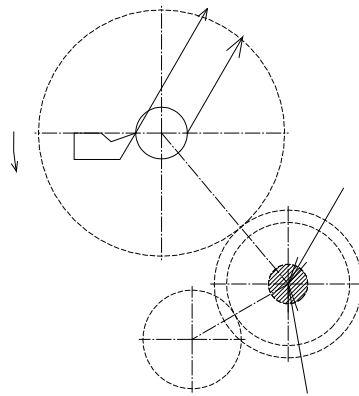


Рис. 1. Поперечне компонування коробки швидкостей за критерієм максимальної жорсткості

У другому варіанті використовується критерій мінімального наведеного навантаження на передню опору (Рис. 2), який реалізується за умови паралельності та спрямованості у протилежний бік сил R і Q .

Побудова просторового компонування здійснюється в модулі APM Graph [23-25]. Перевага креслярсько-графічного параметричного редактора APM Graph полягає в тому, що розроблений програмний інтерфейс користувача простий та інтуїтивно зрозумілий в експлуатації. Процес створення параметричної моделі максимально наближений до варіанту

звичайного креслення деталей [26]. Для того щоб отримати параметричну модель, необхідно просто поставити у відповідність до числових параметрів математичні формули та/або логічні вирази (якщо це потрібно). Значні переваги у процесі побудови параметричних моделей надає база даних, вбудована як модуль APM WinMachine. Прослідкувати правильність виконання параметричних команд, які використовуються побудованою моделлю, можна візуально.

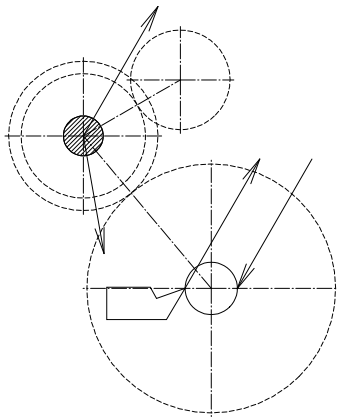


Рис. 2. Поперечне компонування коробки швидкостей за критерієм мінімального наведеного навантаження

Нижче наведено фрагмент алгоритму синтезу компонування за критерієм максимальної жорсткості (Рис. 3).

Переменная	Выражение	Значение	Комментарий
dm1		120	шестерня на входном валу
dm2		100	колесо на входном валу
dm3		200	колесо на шпинделе
dm4		80	шестерня на промежуточном валу
a0		60	угол силы резания
a1	$(90-a0)+20$	50	угол наклона ведущего вала(силы резания и в
a		140	угол между силами на ведущем валу
a2	$90-a0$	30	Угол наклона силы P1 к вертикали
a3	$180-(a2+a)$	10	Угол наклона силы P2 к вертикали (вертикаль
a4	$a3+20$	30	Угол наклона промежуточного вала от горизон

Рис. 3. Фрагмент алгоритму синтезу компоновки

Залежно від прийнятої схеми різання, геометрії інструменту та режимів різання буде змінюватися положення кута нахилу результуючої сили різання, а отже, і положення вихідного валу КШ відповідно до запропонованої програми. На основі запропонованого алгоритму параметризації розроблено параметричну модель КШ верстата MC-03 (Рис. 4). До обмежень цієї моделі відносяться граничні відстані між зовнішньою поверхнею зубчастого колеса і бічною стінкою (x), а також дном корпусу (k) [27-29].

В останніх версіях APM WinMachine є новий тип змінної – «Змінна-повідомлення», яка робить "дружнішим" інтерфейс проектування. Нижче наведено приклад змінної повідомлення (Рис. 5), яка візуалізується у робочому вікні у разі порушення граничних значень x та k .

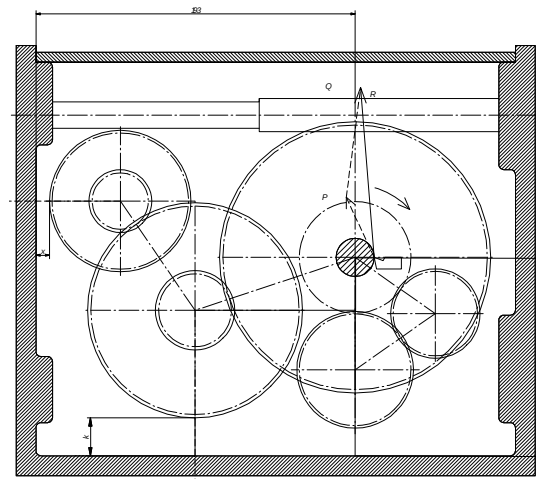


Рис. 4. Коробка швидкостей верстата моделі MC-03 (параметрична модель)

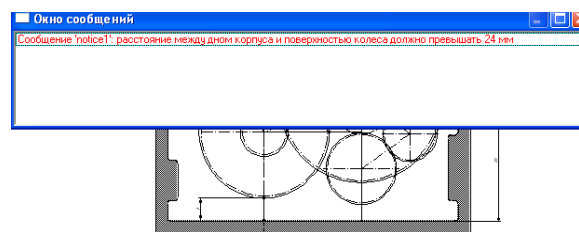


Рис. 5. Змінна-повідомлення: неприпустима відстань

Спроба при існуючих габаритах корпусу КШ реалізувати критерій максимальної жорсткості призвела до неприпустимого розташування вихідного валу щодо дна корпусу (Рис. 6).

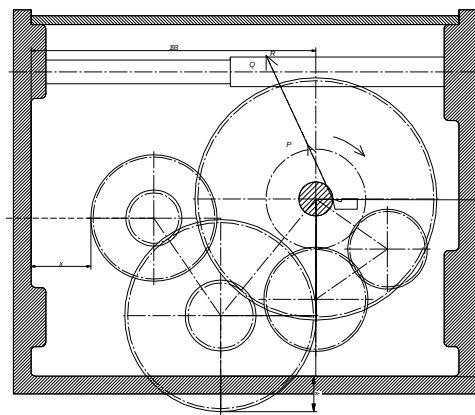


Рис. 6. Варіант компонування з максимальною жорсткістю

Для визначення відмінності заводського варіанта (Рис. 5) та оптимального жорсткості (Рис. 6) скористаємося модулем розрахунку валів APM Shaft. Розрахунок максимальної стріли прогину переднього кінця шпинделя у заводському варіанті (відхилення від сили різання $32,4^\circ$) відрізняється від оптимального на 4%. В середовищі APM Graph сконструйована поперечна згортка КШ верстата моделі MC-03 (Рис. 7).

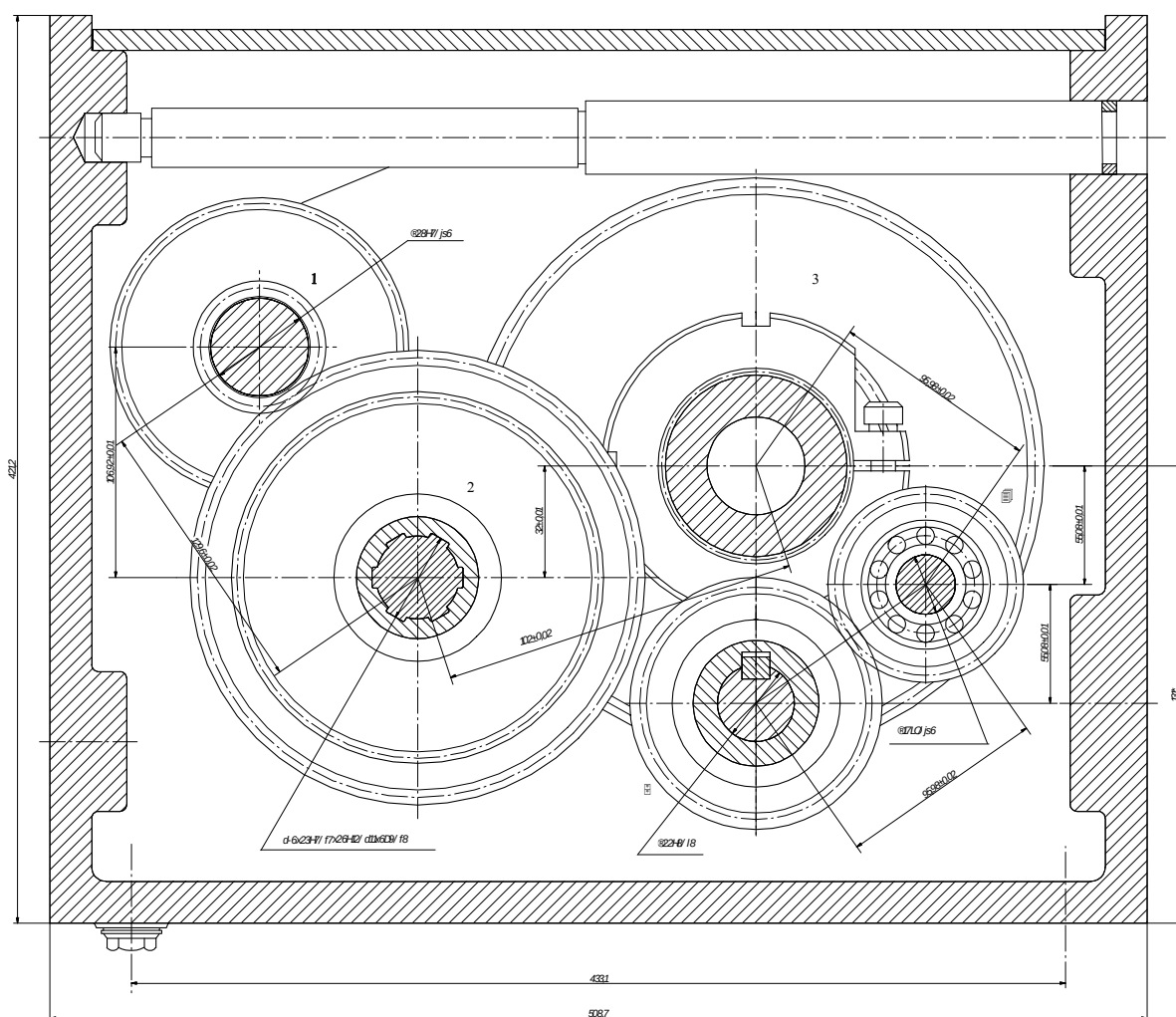


Рис. 7. Конструкція коробки швидкостей багатоцільового верстата (поперечне компонування)

Використання розробленого У складі модуля APM Graph є база даних [13], яка може бути використана для відображення типових деталей, вузлів та графічних фрагментів. Наявність розробленого параметризатора дозволяє користувачеві формувати власні бібліотеки деталей та вузлів різного ступеня складності. Єдина база даних системи APM WinMachine була доповнена графічною бібліотекою у параметризованому вигляді [30]. Особливу увагу було приділено варіантам виконання елементів механічних передач (зубчастих, черв'якових, ремінних та інш.).

механізму параметризації значно підвищує ефективність дослідження допустимих компоновок з урахуванням побудованих параметричних моделей. У цьому кожен новий варіант синтезується лише зміною критерію оптимізації. Такий підхід до проектування на базі параметричних моделей підвищує якість прийнятих проектних рішень та продуктивність праці конструкторів.

Висновки

В результаті виконання цього дослідження отримано такі результати:

1. Розроблено комплекс параметричних моделей поперечних компоновок коробок швидкостей токарних верстатів у модулі APM Graph, що входить до складу інтегрованої САПР APM WinMachine. При побудові параметричних моделей використано синтаксис APM WinMachine, що дозволяє ефективно вирішувати завдання формування геометричних просторових машинобудівних виробів.

2. Створено алгоритми побудови оптимальних компоновок на базі двокритеріальної задачі пошуку найкращого варіанту розташування валів та зубчастих коліс у фіксованому обсязі, обмеженому корпусом коробки швидкостей.

3. Реалізована процедура ідентифікації неприпустимих варіантів розташування зубчастих коліс щодо бічних сторін та дна корпусної деталі КШ, яка кардинально зменшує кількість варіантів, що розглядаються, при багатоваріантному проектуванні.

4. Підвищено продуктивність праці конструктора-верстатобудівника та якість прийнятих проектних рішень за рахунок вибору оптимальних компонентів на базі інструментарію параметризації.

Література

- Бушуев В.В. Основы конструирования станков. Москва: Станкин, 1992. 520 с.
- Проектирование и расчет металлорежущих станков на ЭВМ: Учебное пособие для вузов/О.В. Таратынов, О.И. Аверьянов, В.В. Клепиков и др. Москва: МГИУ, 2002. 384 с.
- Кіпчарський В.П. Металорізальні верстати: Навчальний посібник. Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2018. 143 с.
- Гайдамака А.В. Деталі машин. Основи теорії та розрахунків: навчальний посібник для студентів машинобудівних спеціальностей усіх форм навчання. Харків: НТУ «ХПІ», 2020. 275 с.
- Дубинець О. Деталі машин. Розрахунок та конструювання. Київ: Талком, 2014. 684 с.
- Sokolov V., Krol O., Stepanova O. Mathematical model of the automatic electrohydraulic drive with volume regulation // TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. Vol.17. – № 1, 2017. – Lublin, Poland. – P. 27–32.
- Krol O., Juravlev V. Modeling of spindle for turret of the specialized tool type SF16MF3 // TEKA Com. Mot. and Energ. in Agriculture. – OL PAN, 2013, Vol.13, № 4, Lublin, Poland. P. 141–147.
- Krol O., Sukhorutchenko I. 3D-modeling and optimization spindle's node machining centre SVM1F4 // TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. – Vol.13. – № 3. 2013. – Lublin, Poland. P. 114–119.
- O Krol, V Sokolov and P Tsankov. Modelling of vertical spindle head for machining centre / J. Physics: Conf. Series **1553** (2020) 012012. – VSPID-2019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1553/1/012012>
- Oleg Krol, Olga Porkuian, Volodymyr Sokolov, Petko Tsankov. Vibration stability of spindle nodes in the zone of tool equipment optimal parameters/ Comptes rendus de l'Academie bulgare des Sciences, 2019, Vol 72, No 11, pp. 1546-1556. DOI: <https://doi.org/10.7546/CRABS.2019.11.12>
- Krol O., Sokolov V. 3D modelling of angular spindle's head for machining centre. *Journal of Physics: Conf. Series*. 2019. 1278, 012002. VSPID-2018. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1278/1/012002>
- Романченко О.В. Вибір системи синхронізації електропривода довгомірних вібраційних верстатів / Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – 2015. – № 52(1162). – С. 13–22.с.
- Замрий А.А. Практический учебный курс CAD/CAE APM WinMachine. Учебно-методическое пособие. Москва: Изд-во АПИМ, 2004. 240 с.
- Krol O., Shevchenko S., Sukhorutchenko I., Lysenko A. 3D-modeling of the rotary table for tool SVM1F4 with non-clearance worm gearing // TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. Vol. 14. № 1. 2014. Lublin, Poland. P. 126–133.
- Мелконов Г., Ветряк С. Удосконалення токарного верстата 1A62 (16K20) шляхом заміни стандартного вузла встановленням взаємо пересувного різцетримача для обробки деталей з малим діаметром при відрізних операціях / Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, № 1(249), 2019, с. 23–25.
- Sokolov V., Porkuian O., Krol O., Baturin Y. (2020) Design Calculation of Electrohydraulic Servo Drive for Technological Equipment. 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. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_8
- Кроль О.С., Кроль А.А., Бурлаков Е.И. Твердотельное моделирование и исследование шпиндельного узла обрабатывающего центра. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. Харків: НТУ «ХПІ», 2013. № 16(989). С. 14–18.
- Николаенко А.П. Формирование поверхности изделия при вибрационной обработке. Вібрації в техніці та технологіях, №2 (58). Вінницький національний аграрний університет, 2010. С. 167–184.
- Krol O.S., Osipov V.I. Modeling of construction spindle's node machining centre SVM1F4 / Comission of Motorization and Power Industry of Agriculture. – OL PAN, 2013, Vol.13, is.3, Lublin, Poland. – P. 108–113.
- Кроль О.С. Методы и процедуры оптимизации режимов резания. Монография. Луганск: Вид-во ЧУУ ім. В.Даля, 2013. 260 с.
- Krol O., Sokolov V. Rational choice of machining tools using prediction procedures / EUREKA: Physics and engineering, Number 4, 2018. p. 14–20. DOI: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2018.00667>
- Кроль О. С., Сухорутченко И. А. Трехмерное моделирование многооперационного станка модели СВМ1Ф4 в среде компас 3D. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2014. Т. 4. № 7 (70). С. 13–18. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.26250>
- Кроль О.С., Кроль А.А. Расчет податливости станка СФ68ВФ4 и моделирование динамики формообразования // Вісник СевНТУ, вип. 117 «Машинобудування та транспорт», Севастополь, 2011. С. 81–84.
- Кроль О.С., Кроль А.А., Синдеева Е.В. Моделирование конструкции четырехопорного вала в САПР АРМ «WinMachine» // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні. 36. наук. пр. Луганськ: ЧУУ ім. В.Даля, 2008. С. 139–143.
- Shevchenko S., Mukhovaty A., Krol O. (2020) Gear Transmission with Conic Axoid on Parallel Axes. In: Radionov A., Kravchenko O., Guzeev V., Rozhdestvenskiy Y. (eds) Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). ICIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. pp. 1–10. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-22041-9_1
- Кроль О.С. Построение параметрических моделей ременных передач с использованием системы АРМ WINMACHINE / Восточноевропейский журнал передовых технологий. 2012. № 2/7(62). С. 61–63.
- Кроль О.С., Шевченко С.В., Синдеева О.В., Покінтелиця М.І. Проектування механічних передач металорізальних верстатів за допомогою системи WinMachine. Навчальний посібник. Луганськ: Вид-во ЧУУ ім. В. Даля, 2007. 200 с.
- Krol O, Sokolov V. Research of modified gear drive for multioperational machine with increased load capacity. *Diagnostyka*. 2020; 21(3):87–93. DOI: <https://doi.org/10.29354/diag/126026>
- Нерубашенко А.А., Кроль О.С., Кроль А.А. Создание базы данных параметрических моделей деталей станков в модуле АРМ Base // Вісник СевНТУ, 2010, вип.107. С.107–109.

30. Krol O., Sokolov V. Parametric modeling of machine tools for designers. Sofia: Prof. Marin Drinov Academic Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2018. 112 p. DOI: <https://doi.org/10.7546/PMMTD.2018>

References

- Bushuev V.V. Osnovy konstruyrovaniya stankov. Moskva: Stankyn, 1992. 520 s.
- Proektyrovaniye y raschet metallorazhushchykh stankov na ЭВМ: Uchebnoe posobie dlya vuzov/O.V. Taratynov, O.Y. Aver'janov, V.V. Klepykov y dr. Moskva: MGYU, 2002. 384 s.
- Kipchars'kij V.P. Metalorizal'ni verstati: Navchal'nij posibnik. Mariupol': DVNZ «PDTU», 2018. 143 s.
- Gajdamaka A.V. Detali mashyn. Osnovy teorii' ta rozrahunkiv: navchal'nyj posibnyk dlya studentiv mashynobudivnykh special'nostej usih form navchannja. Harkiv: NTU «HPI», 2020. 275 s.
- Dubynec' O. Detali mashyn. Rozrahunok ta konstrujuvannja. Kyi'v: Talkom, 2014. 684 s.
- Sokolov V., Krol O., Stepanov O. Mathematical model of the automatic electrohydraulic drive with volume regulation // TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. Vol.17. – № 1. 2017. – Lublin, Poland. – P. 27–32.
- Krol O., Juravlev V. Modeling of spindle for turret of the specialized tool type SF16MF3 // TEKA Com. Mot. and Energ. in Agriculture. – OL PAN, 2013, Vol.13, No. 4, Lublin, Poland. P. 141–147.
- Krol O., Sukhorutchenko I. 3D-modeling and optimization spindle's node machining centre SVM1F4 // TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. – Vol.13. – № 3. 2013. – Lublin, Poland. P. 114–119.
- O Krol, V Sokolov and P Tsankov 2020 Modelling of vertical spindle head for machining centre / J. Physics: Conf. Series **1553** (2020) 012012. – VSPID-2019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1553/1/012012>
- Oleg Krol, Olga Porkuian, Volodymyr Sokolov, Petko Tsankov. Vibration stability of spindle nodes in the zone of tool equipment optimal parameters/ Comptes rendus de l'Academie bulgare des Sciences, Vol 72, No 11, pp.1546-1556. DOI: <https://doi.org/10.7546/CRABS.2019.11.12>
- Krol O., Sokolov V. 3D modelling of angular spindle's head for machining centre. *Journal of Physics: Conf. Series*. 2019. 1278, 012002. VSPID-2018. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1278/1/012002>
- Romanchenko O.V. Vibir sistemi sinhronizatsiyi elektroprivoda dovgomirnih vibratsiyniy verstativ / Visnik NTU "HPI". Seriya: Mehaniko-tehnologichni sistemi ta kompleksi. – 2015. – No 52(1162). – S. 13–22.
- Zamryj A.A. Praktycheskyj uchebnyj kurs SAD/CAE APM WinMachine. Uchebno-metodycheskoe posobie. Moskva: Yzd-vo APM, 2004. 240 s.
- Krol O., Shevchenko S., Sukhorutchenko I., Lysenko A. 3D-modeling of the rotary table for tool SVM1F4 with non-clearance worm gearing // TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. Vol. 14. № 1. 2014. Lublin, Poland. P. 126–133.
- Melkonov G., Vetryak E. Udoskonalennya tokarnogo verstata 1A62 (16K20) shlyahom zamini standartnogo vuzla vstanovlennam vzaemo peresuvnogo riztsetrimacha dlya obrobki detaley z malim diametrom pri vidriznih operatsiyah / Visnik Shidnoukrayniskogo natsionalnogo universitetu imeni Volodimira Dallya, No 1(249), 2019. – S. 23–25.
- Sokolov V., Porkuian O., Krol O., Baturin Y. (2020) Design Calculation of Electrohydraulic Servo Drive for Technological Equipment. 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. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_8
- Krol' O.S., Krol' A.A., Burlakov E.Y. Tverdotel'noe modelyrovaniye y yssledovaniye shpyndel'nogo uzla obrabatyvajushhego centra. Visnyk Nacional'nogo tehničnogo universytetu «HPI». Serija: Novi rishennja v suchasnyh tehnologijah. Har'kiv: NTU «HPI», 2013. № 16 (989). S. 14–18.
- Nikolaienko A.P. Formyrovaniye poverkhnosti yzdeliya pry vybratsyonnoy obrabotke. Vibratsiyni v tekhnitsi ta tekhnologiyakh, №2 (58). Vinnyts'kyi natsional'nyy ahraryny universytet, 2010. P. 167–184.
- Krol O.S., Osipov V.I. Modeling of construction spindle's node machining centre SVM1F4 / Commission of Motorization and Power Industry of Agriculture. – OL PAN, 2013, Vol.13, is.3, Lublin, Poland. – P. 108–113
- Krol' O.S. Metody y procedury optymizatsiyi rezhymov rezanyia. Monografija. Lugansk: Vyd-vo SNU im. V. Dalja, 2013. 260 s.
- Krol O., Sokolov V. Rational choice of machining tools using prediction procedures / EUREKA: Physics and engineering, Number 4, 2018. p. 14–20. DOI: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2018.00667>
- Krol' O. S., Suhorutchenko Y. A. Trehmernoe modelyrovaniye mnogooperatsionnogo stanka modeli SVM1F4 v srede kompasa 3D. Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovykh tehnologij. 2014. T. 4. № 7 (70). S. 13–18. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.26250>
- Krol' O.S., Krol' A.A. Raschet podatlyvosti stanka SF68VF4 y modelyrovaniye dynamiky formoobrazovaniya // Visnyk SevNTU, vyp. 117 «Mashynobuduvannja ta transport», Sevastopol', 2011. S. 81–84
- Krol' O.S., Krol' A.A., Syndeeva E.V. Modelyrovaniye konstruktsiyi chetyrehopornogo vala v SAPR ARM «WinMachine» // Resursozberigajuchi tehnologii' vyrobnyctva ta obrobky tyskom materialiv u mashynobuduvanni. Zb. nauk. pr. Lugansk: SNU im. V. Dalja, 2008. S. 139–143.
- Shevchenko S., Mukhovaty A., Krol O. (2020) Gear Transmission with Conic Axoid on Parallel Axes. In: Radionov A., Kravchenko O., Guzeev V., Rozhdestvenskiy Y. (eds) Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). ICIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. pp. 1–10. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-22041-9_1
- Krol' O.S. Postroyeniye parametrycheskykh modelej remennykh peredach s yspol'zovaniyem systemy ARM WINMACHINE / Vostochnoevropijskij zhurnal peredovykh tehnologij. 2012. № 2/7(62). S. 61–63.
- Krol' O.S., Shevchenko S.V., Sindjejeva O.V., Pokintelycja M.I. Proektuvannja mehanichnykh peredach metalorizal'nykh verstativ za dopomogoju systemy WinMachine. Navchal'nyj posibnyk. Lugansk: Vyd-vo SNU im. V. Dalja, 2007. 200 s.
- Krol O, Sokolov V. Research of modified gear drive for multioperational machine with increased load capacity. Diagnostyka. 2020; 21(3):87–93. DOI: <https://doi.org/10.29354/diag/126026>
- Nerubashhenko A.A., Krol' O.S., Krol' A.A. Sozdaniye bazy dannykh parametrycheskykh modelej detalej stankov v module ARM Base // Visnyk SevNTU, 2010, vyp.107. S.107–109.
- Krol O., Sokolov V. Parametric modeling of machine tools for designers. Sofia: Prof. Marin Drinov Academic Pub-

lishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2018. 112 p. DOI: <https://doi.org/10.7546/PMMTD.2018>

Krol O., Aliev V. Modeling of the structure of a four-support shaft by the stiffness criterion

Procedures for construction and modeling of transverse configurations of multi-operational screw-cutting lathe using parametric modeling methods are considered. It is proposed to consider the problem of the spatial layout synthesis for the drive of the main movement of the lathe (gearbox) as a two-criterion optimization problem. There are two main criteria for the effectiveness of the constructing task for transverse layout: 1) maximizing the stiffness of the output shaft of the gearbox and the machine spindle; 2) minimize the induced load on the front spindle support. A study of the optimization criteria influence on design decisions in the development of layout solutions in the working space of the machine. Algorithms and programs of parametric representation of multi-stage gearboxes in the integrated system of automated design "WinMachine" environment are developed. The efficiency of application of parameterization syntax in problems of geometric analysis and synthesis of spatial position of shafts and gears for metal-cutting equipment gearboxes is shown. The efficiency of using the APM Graph module interface in case of non-normative situations related to violation of the minimum allowable distance of the gears outer surface with the side wall of the housing and the bottom of the gearbox housing is shown. The peculiarity of the application of parameterization tools related to the use of a specialized design database of the

environment WinMachine automated design system is considered. The estimation of the difference between the factory variant and the obtained variant according to the criterion of optimal rigidity is given. For this purpose, the APM Shaft calculation module was used and the maximum deflection boom of the front end of the spindle was calculated in the two above-mentioned variants. The efficiency of application of the database section, which functions both with traditional graphic primitives and with structural elements in the parametric representation, is noted. The solution of the two-criterion problem of designing a lathe gearbox according to the criteria of maximum rigidity and minimum load on the front shaft support is proposed.

Keywords: spatial layout, main motion drive, lathe, parametric model, optimization criterion.

Кроль Олег Соломонович – к.т.н., доц., професор кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк), krolos.snu.edu@gmail.com

Алієв Валерій Едуардович – студент групи ГМ-20дм, факультет інженерії, кафедра машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк) alieff.valery2013@gmail.com

Стаття подана 01.02.2022 р.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-272-2-36-41>

УДК 621.952.5:629

МОДЕЛЮВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ ЧОТИРИОПОРНОГО ВАЛУ ЗА КРИТЕРІЕМ ЖОРСТКОСТІ

Кроль О.С., Голубенко О.Л., Слєпченко К.І.

MODELING OF THE STRUCTURE OF A FOUR-SUPPORT SHAFT BY THE STIFFNESS CRITERION

Krol O.S., Golubenko O.L., Slepchenko K.I.

Наведено засоби та інструменти проектування та моделювання багатоопорних валів із застосуванням твердотілого моделювання та методу скінченних елементів при виборі оптимальної конструкції валу та його опор. Розроблено поперечну компоновку приводу, яка визначатиме характер навантаження та конструктивну схему вала. Цей вал розглядається як стрижнева конструкція на чотирьох шарнірних опорах, у яких основною проблемою продуктивності є недостатня жорсткість і високі рівні напружень на окремих ділянках. Розглянуто процедуру розробки пружно-деформаційної моделі як комплексу двох незалежних завдань: статику вала як стрижня на пружних опорах (розрахунок пружної лінії вала) та відповідні характеристики підшипників. Запропоновано процедуру побудови тривимірної моделі на чотириопорній конструкції валу для багатоопераційного свердлильно-фрезерно-розточувального верстата в інтегрованому робочому місці САПР APM WinMachine. Використано взаємопов'язані модулі твердотілого моделювання «APM Studio» та «APM Structure3D», а також спеціалізований модуль для проектування валів «APM Shaft», які входять до середовища САПР APM WinMachine. Використовується спеціалізоване параметричне ядро з дуже зручним інтерфейсом, що забезпечує різке підвищення продуктивності конструктора в процесі моделювання валів верстатів. Розрахунок підшипника 4-309 виконано за допомогою модуля «ARM Bear», який базується на комплексі верифікаційних розрахунків неідеальних підшипників, включаючи визначення переміщень і діаграм розподілу зусиль з урахуванням статистичної дисперсії. Розглянуто багатоваріантний розрахунок пружно-деформаційного стану методом скінченних елементів у середовищі інтегрованої системи автоматизованого проектування. Проведений аналіз переміщень і кутів повороту в різних ділянках валу на жорстких шарнірних опорах і встановлено, що їх значення знаходяться в допустимих межах, що підтверджує ефективність роботи чотириопорної валової конструкції. Максимальні напруження, які виникають у циліндровій поверхні, визначаються за допомогою параметра «Напруження в перетині». Показано, як змінюються пружно-деформаційні характеристики при переході від жорстких до пружно-деформаційних шарнірних опор.

Ключові слова: багатоопорний вал, металорізальний верстат, 3D модель, метод скінченних елементів, діаграма напружень, епюри переміщень.

Вступ. Досягнення високих техніко-експлуатаційних показників формотворних вузлів та деталей металорізальних верстатів (МВ) неможливе без повного уявлення про їх механіку та докладного аналізу різноманіття факторів, що впливають на їх якість [1-3]. У цьому виникає практично важливе завдання створення комплексної математичної моделі компонентів МВ [4-6].

Для валів металорізальних верстатів відомі типові схеми, які дозволяють представляти вали у вигляді окремих верстатних модулів, досягаючи при цьому скорочення термінів проектування [7, 8]. Використання цих схем передбачає постійне звернення конструктора до автоматизованих довідників (баз даних), що містять необхідну інформацію: типові схеми валів, каталоги підшипникових опор, довідкові матеріали за нормами точності та ін. Разом з тим існують такі компоновки верстатів (наприклад, верстати оснащені вертикальним та горизонтальним шпинделями), приводи головного руху яких включають вали, які не можна віднести до типових схем. Так, вихідний вал (довжиною більше 1м) широкоуниверсального свердлильно-фрезерно-розточувального верстата моделі СФ68ВФ4 передає через рухому шестірню обертання на горизонтальний шпиндель, а через муфту (при виведеній із зачеплення шестірні) на вертикальну головку. [9-11]. Цей вал монтується на чотирьох опорах різного типу, при цьому завдання вибору типу опор, типорозміру підшипників, способу та величини попереднього натягу передбачає застосування процедур моделювання.

У ранніх роботах з автоматизованого проектування валів [12] представлена програма VAL для перевірок розрахунків дев'яти основних розрахункових схем двоопорних валів. Для кожної розрахункової схеми виконуються обчислення реакцій опор, значення згинальних та обертових моментів у 5-7 перерізах для побудови епюр; проводяться розрахунки на статичну міцність та опір втоми у трьох небезпечних перерізах, а також розрахунки на жорсткість у 5-7 перерізах. Ще один пакет прикладних програм SPRT для розрахунку пружно-деформаційних характеристик високошвидкісних шпиндельних вузлів мають не більше 75 ступенів свободи [12]. Обмеження масштабів завдань спричинено недостатніми обчислювальними ресурсами. У сучасних системах автоматизованого проектування, таких як APM WinMachine [13-15], проводиться моделювання складних конструкцій, максимальна розмірність яких оцінюється величиною до 50 тисяч вузлів і до 300 тисяч ступенів свободи (при максимальному обсязі оперативної пам'яті 2 Гб).

Разом з тим єдиного підходу до оцінки рівня допустимих навантажень і працездатності досить складних чотириопорних конструкцій валів з різними типами підшипникових опор не представлено у роботах, що розглядаються вище.

Метою даної роботи є створення комплексної процедури оцінювання напружено-деформованого стану чотириопорних валів сучасних верстатів з ЧПК та обробних центрів.

Для досягнення цієї мети пропонується така процедура:

1. Здійснити постановку та розв'язання задачі пружно-деформаційного опису конструкції вала приводу головного руху свердильно-фрезерно-розточувального верстата.
2. Розробити тривимірну модель конструкції вала в середовищі інтегрованої САПР.
3. Здійснити розрахунок конструкції методом скінчених елементів та оцінити працездатність конструкції за критерієм жорсткості.

3D моделювання вала багатооперативного верстата. Розглядаючи чотириопорний вал як складну механічну систему, можна виділити окремі групи його функціональних властивостей, що вимагають розробки самостійних математичних моделей [16, 17]:

- пружно-деформаційної, що визначає навантаження, деформації та жорсткості кожного елемента системи;
- динамічної, що визначає власні частоти та передавальні функції системи;
- вібраційної, що визначає спектральні характеристики системи.

Завдання розробки пружно-деформаційної моделі може розглядатися як сукупність двох незалежних завдань – статика вала як стрижня на пружних опорах (розрахунок пружної лінії вала) і відповідних характеристик підшипників.

Розглянемо задачу представлення пружно-деформаційного опису вихідного вала приводу головного руху верстата моделі СФ68ВФ4 [18, 19]. На Рис.1 представлена поперечна розгортка приводу, яка зумовить характер навантаження та розрахункову схему вала (Рис. 2).

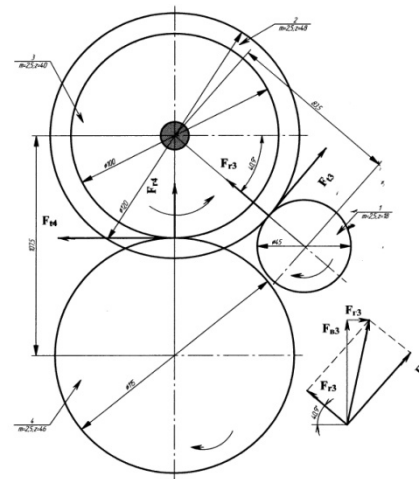


Рис. 1. Поперечне компонування приводу головного руху



Рис. 2. Розрахункова схема вихідного вала

Даний вал розглядається як стрижнева конструкція на чотирьох шарнірних опорах. Основними проблемами працездатності є недостатня жорсткість і високий рівень напруг у певних перерізах. Підвищення несучих властивостей пов'язане як з вибором форм і конструкції самого вала, так і з вибором типу та типорозмірів опор. Таке завдання багатоваріантного проектування передбачає використання процедур моделювання та чисельних методів [20-22]. В даному випадку використовуються взаємопов'язані модулі твердотільного моделювання «APM Studio» і «APM Structure3D», а також спеціалізований модуль проектування валів «APM Shaft», що входять до CAD/CAM/CAE/PDM «APM WinMachine» [23,24]. Для здійснення процедури моделювання створена твердотільна модель вала (Рис. 3), яку розбиваємо на 29138 скінчених елементів.

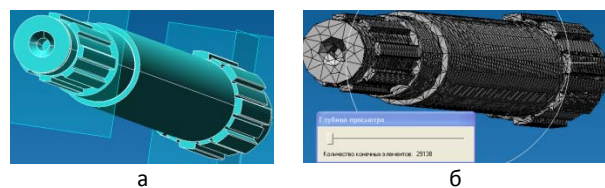


Рис. 3. 3D моделювання вала:
а – твердотільна модель; б – скінчено-елементне розбиття

Оцінювання пружно-деформаційного стану вала в САПР APM WinMachine. В результаті розрахунків стає можливим визначити характер напру-

жено-деформованого стану в будь-якій точці конструкції (Рис. 4). Розрахунок показав, що дана конструкція має достатній запас міцності – $\sigma_{\max} = 96$ МПа (Ст20Х характеризується межею плинності $\sigma_T = 635$ МПа, коефіцієнт запасу плинності $n_T = 1,5$). Причому максимальні напруги виникають у шліцевій поверхні з боку проміжного валу. Для визначення характеру домінуючих напруг та оцінки правильності орієнтації перерізу є опція «Напруга в перетині».

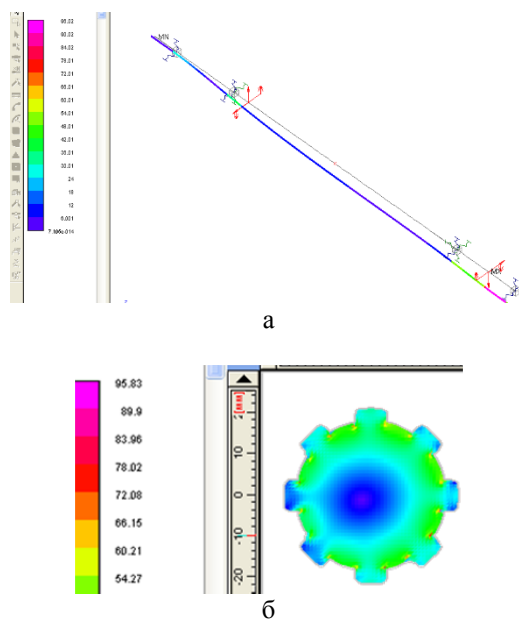


Рис. 4. Результати розрахунку:
а – карта еквівалентної напруги; б – напруга в перетині

Для оцінки жорсткості доцільно використовувати спеціалізований модуль «APM Shaft» [25, 26] в якому побудуємо епюри моментів, переміщень, кутів повороту, напруг і коефіцієнтів запасу за втомною міцністю (Рис. 5) для двох варіантів уявлення опор – жорсткої шарнірної опори і пружної опори.

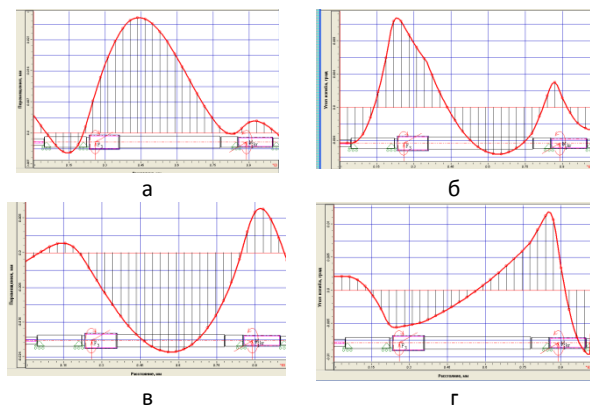


Рис. 5. Епюри переміщень та кутів повороту валу на жорстких опорах: а; б – у вертикальній площині; в; г – у горизонтальній площині

Аналіз переміщень та кутів повороту в різних перерізах валу на жорстких шарнірних опорах показує, що їх значення знаходяться в межах допустимих: $[\theta] = 0,0290^\circ$; $[y] = 0,1276$ мм; $\Theta_{\max} = 0,01180^\circ < [\theta]$; $y_{\max} = 0,032$ мм $< [y]$.

В останні роки для розрахункової оцінки підшипників багатоопорних систем почали застосовувати метод ПБК (підшипник-вал-корпус). Сутність цього методу полягає в тому, що шукані параметри вузла визначаються із спільного вирішення завдання пружної рівноваги вузла в цілому з урахуванням пружних властивостей підшипників, валу та корпусу.

Аналіз впливу типу опор на параметри жорсткості валу. Розглянемо як змінюються пружно-деформаційні характеристики при переході від жорстких до пружно-податливих шарнірних опор. Відповідно до відомих методик проведено розрахунок жорсткості всіх чотирьох опор валу: Ліва опора – здвоєні радіально-упорні підшипники 4-46109 особливо легкої серії, змонтовані за «О-подібною схемою», має жорсткість $j_1 = 8 \cdot 10^4$ Н/мм;

Проміжні опори – радіальні однорядні підшипники 4-109 особливо легкої серії діаметрів 1, серія ширин 0, мають жорсткість: $j_2 = 34599$ Н/мм; $j_3 = 30580$ Н/мм; Права опора – підшипник кульковий радіальний сферичний дворядний 4-1507, що має жорсткість $j_4 = 22510$ Н/мм.

Результати пружно-деформаційного розрахунку показують, що значення кутів повороту в перерізах валу не перевищують допустиме значення $\Theta_{\max}$. Разом про те, переміщення пружної лінії валу в середній частині перевищують допустимі: $y = 0,191$ мм $> [y]$ (Рис. 6).

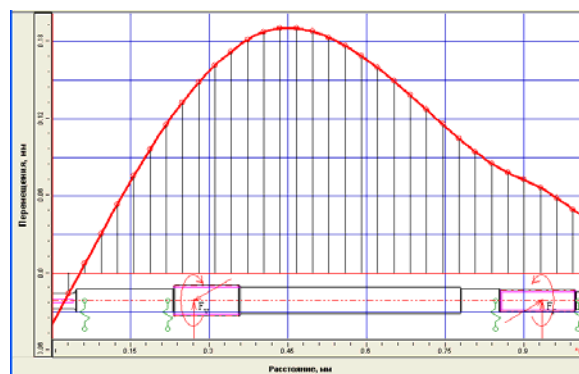


Рис. 6. Епюра переміщень валу

Алгоритм посилення проміжної опори включає перехід від особливо легкої до легкої, потім до середньої та важкої серій. Якщо габарити важкої серії великі або не забезпечують нормативних значень динамічної вантажопідйомності, то здійснюється перехід до іншого типу підшипників, наприклад до жорсткіших радіальних роликотопідшипників або до іншої схеми розташування підшипників на валу. Тільки після цього доцільно збільшити діаметр посадкової поверхні.

Так, перехід до радіального підшипника легкої серії 4-209, дозволив підвищити жорсткість – переміщення в небезпечному перерізі знизилася до $y = 0,178$ мм. Разом про те найкраще наближення до граничних переміщень дає застосування радіального підшипника середньої серії 4-309.

Розрахунок радіального підшипника в модулі APM Bear. Зробимо розрахунок підшипника 4-309 за допомогою модуля "APM Bear", результати якого представлені на Рис. 7. В середовищі "APM Bear" виконується весь комплекс перевірок розрахунків неідеальних підшипників, що включають визначення переміщень та діаграми розподілу сил з урахуванням статистичного розсіювання.

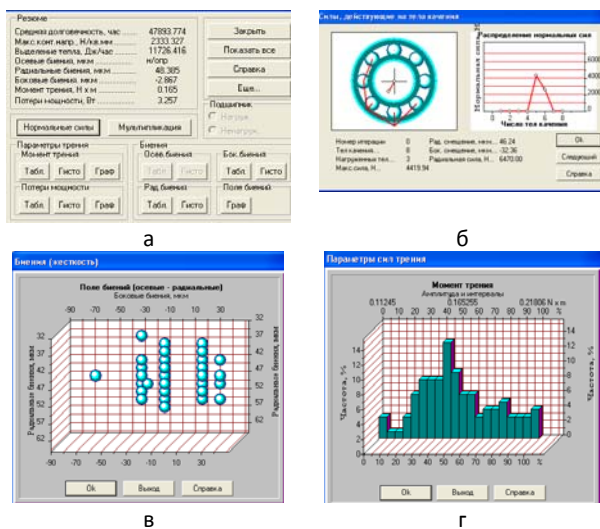


Рис. 7. Результати розрахунку радіального підшипника 4-309: а – основні параметри; б – сили, що діють на тіла кочення; в – биття (жорсткість); г – момент тертя

Висновки

Ефективне проведення моделювання конструкцій 4-х опорних валів здійснюється за допомогою модулів САПР WinMachine. На базі проведеного пружно-деформаційного дослідження знайдено «вузькі» місця конструкції та запропоновано нові рішення щодо вибору опор валів. На базі отриманих результатів показана необхідність зміни серії підшипника правої опори валу до середньої, що забезпечує допустиме переміщення, а значить буде відповідати критерію жорсткості. Такий вибір підкріплюється комплексним дослідженням напружено-деформаційного стану на базі твердотільних моделей та комплексним дослідженням неідеальних підшипників чотирьох опорного валу металорізального верстата.

Література

1. Металлорежущие станки: Учебник для машиностроительных вузов / Под ред. В.Э. Пуша. Москва: Машиностроение, 1985. 575 с.
2. Бочков В.М., Сілін Р., Гаврильченко О.В. Розрахунок та конструювання металорізальних верстатів: Підручник. Львів: Вид-во «Бескид Біт», 2008. 448 с.

3. Кіпчарський В.П. Металорізальні верстати: Навчальний посібник. Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2018. 143 с.
4. Sokolov V., Krol O., Stepanova O. Mathematical model of the automatic electrohydraulic drive with volume regulation // *TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture*. Vol.17. – № 1, 2017. – Lublin, Poland. P. 27–32.
5. Krol O., Juravlev V. Modeling of spindle for turret of the specialized tool type SF16MF3 // *TEKA Com. Mot. and Energ. in Agriculture*. – OL PAN, 2013, Vol.13, No. 4, Lublin, Poland. P. 141–147.
6. Krol O., Sukhorutchenko I. 3D-modeling and optimization spindle's node machining centre SVM1F4 // *TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture*. – Vol.13. – № 3. 2013. – Lublin, Poland. P. 114–119.
7. Гайдамака А.В. Деталі машин. Основи теорії та розрахунків: навчальний посібник для студентів машинобудівних спеціальностей усіх форм навчання. Харків: НТУ «ХПІ», 2020. 275 с.
8. Дубинець О. Деталі машин. Розрахунок та конструювання. Київ: Талком, 2014. 684 с.
9. O Krol, V Sokolov and P Tsankov. Modelling of vertical spindle head for machining centre / *J. Physics: Conf. Series* **1553** (2020) 012012. – VSPID-2019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1553/1/012012>
10. Oleg Krol, Olga Porkuian, Volodymyr Sokolov, Petko Tsankov. Vibration stability of spindle nodes in the zone of tool equipment optimal parameters/ *Comptes rendus de l'Academie bulgare des Sciences*, 2019, Vol 72, No 11, pp. 1546-1556. DOI: <https://doi.org/10.7546/CRABS.2019.11.12>
11. Krol O., Sokolov V. 3D modelling of angular spindle's head for machining centre. *Journal of Physics: Conf. Series*. 2019. 1278, 012002. VSPID-2018. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1278/1/012002>
12. Расчет деталей машин на ЭВМ: Учеб. пособие для машиностр.вузов / Д.Н. Решетов, С.А.Шувалов, В.Д.Дудко и др.; Под.ред. Д.Н.Решетова и С.А. Шувалова. М.: Высш.шк., 1985. 368 с.
13. Замрий А.А. Практический учебный курс CAD/CAE APM WinMachine. Учебно-методическое пособие. Москва: Изд-во АПМ, 2004. 240 с.
14. Krol O., Shevchenko S., Sukhorutchenko I., Lysenko A. 3D-modeling of the rotary table for tool SVM1F4 with non-clearance worm gearing // *TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture*. Vol. 14. № 1. 2014. Lublin, Poland. P. 126–133.
15. Mitsyk A.V., Fedorovich V.A., Grabchenko A.I. The effect of a shock wave in an oscillating working medium during vibration finishing-grinding processing. *Cutting & Tools in Technological System. Kharkiv: NTU "KPI"*, 2020. Ed. 93. P. 43 – 55. <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2020.93.06>
16. Sokolov V., Porkuian O., Krol O., Baturin Y. (2020) Design Calculation of Electrohydraulic Servo Drive for Technological Equipment. 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. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_8
17. Кроль О.С., Кроль А.А., Бурлаков Е.И. Твердотельное моделирование и исследование шпиндельного узла обрабатывающего центра. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. Харків: НТУ «ХПІ», 2013. № 16(989). С. 14–18.

18. Мицук А.В., Федорович В.А. Развитие новых технологий вибрационной отделочно-зачистной и упрочняющей обработки деталей общемашиностроительного применения. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. Харків: НТУ «ХПІ», 2012. № 47 (953). С. 226 – 233.
19. Krol O.S., Osipov V.I. Modeling of construction spindle's node machining centre SVM1F4 / Commission of Motorization and Power Industry of Agriculture. OL PAN, 2013, Vol.13, is.3, Lublin, Poland. – P. 108–113.
20. Кріль О.С. Методи и процедури оптимізації режимів різання. Монографія. Луганськ: Вид-во ЧНУ ім. В.Далі, 2013. 260 с.
21. Krol O., Sokolov V. Rational choice of machining tools using prediction procedures / EUREKA: Physics and engineering, Number 4, 2018. p. 14–20. DOI: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2018.00667>
22. Кріль О.С., Сухорутченко І.А. Трехмерное моделирование многооперационного станка модели СВМ1Ф4 в среде компас 3D. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2014. Т. 4. № 7 (70). С. 13–18. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.26250>
23. Кріль О.С., Кріль А.А. Расчет податливости станка СФ68ВФ4 и моделирование динамики формообразования // Вісник СевНТУ, вип. 117 «Машинобудування та транспорт», Севастополь, 2011. С. 81–84.
24. Кріль О.С., Кріль А.А., Синдеева Е.В. Моделирование конструкции четырехопорного вала в САПР АРМ «WinMachine» // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні. Зб. наук. пр. Луганськ: ЧНУ ім. В.Далі, 2008. С. 139–143.
25. Shevchenko S., Mukhovaty A., Krol O. (2020) Gear Transmission with Conic Axoid on Parallel Axes. In: Radionov A., Kravchenko O., Guzev V., Rozhdestvenskiy Y. (eds) Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). ICIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. pp. 1–10. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-22041-9_1
26. Кріль О.С. Построение параметрических моделей ременных передач с использованием системы АРМ WINMACHINE / Восточноевропейский журнал передовых технологий. 2012. № 2/7(62). С. 61–63.
27. Кріль О.С., Шевченко С.В., Синдеева О.В., Покінтелиця М.І. Проектування механічних передач металорізальних верстатів за допомогою системи WinMachine. Навчальний посібник. Луганськ: Вид-во ЧНУ ім. В.Далі, 2007. 200 с.
28. Krol O, Sokolov V. Research of modified gear drive for multioperational machine with increased load capacity. *Diagnostyka*. 2020; 21(3):87–93. DOI: <https://doi.org/10.29354/diag/126026>
29. Нерубашенко А.А., Кріль О.С., Кріль А.А. Создание базы данных параметрических моделей деталей станков в модуле АРМ Base // Вісник СевНТУ, 2010, вип.107. С.107–109.
30. Krol O., Sokolov V. Parametric modeling of machine tools for designers. Sofia: Prof. Marin Drinov Academic Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2018. 112 p. DOI: <https://doi.org/10.7546/PMMTD.2018>
31. Metallezhushhye stanky: Uchebnyk dlja mashynostroytel'nyh vtuzov / Pod red. V.Э. Pusha. Moskva: Mashynostroeny, 1985. 575 s.
32. Bochkov V.M., Silin R., Gavryl'chenko O.V. Rozrazhunok ta konstruivannja metalorizal'nyh verstativ: Pidruchnyk. L'viv: Vyd-vo «Beskyd Bit», 2008. 448 s.
33. Kipchars'kij V.P. Metalorizal'ni verstati: Navchal'nij posibnik. Mariupol': DVNZ «PDTU», 2018. 143 s.
34. Sokolov V., Krol O., Stepanova O. Mathematical model of the automatic electrohydraulic drive with volume regulation // TEKA Commision of Motorization and Energetic in Agriculture. Vol.17. – № 1. 2017. – Lublin, Poland. – P. 27–32.
35. Krol O., Juravlev V. Modeling of spindle for turret of the specialized tool type SF16MF3 // TEKA Com. Mot. and Energ. in Agriculture. OL PAN, 2013, Vol.13, № 4, Lublin, Poland. P. 141–147.
36. Krol O., Sukhorutchenko I. 3D-modeling and optimization spindle's node machining centre SVM1F4 // TEKA Commision of Motorization and Energetic in Agriculture. Vol.13. № 3. 2013. Lublin, Poland. P. 114–119.
37. Gajdamaka A.V. Detali mashyn. Osnovy teorii' ta rozrahunkiv: navchal'nyj posibnyk dlja studentiv mashynobudivnyh special'nostej usih form navchannja. Harkiv: NTU «HPI», 2020. 275 s.
38. Dubynec' O. Detali mashyn. Rozrazhunok ta konstruivannja. Kyi'v: Talkom, 2014. 684 s.
39. Krol, V Sokolov and P Tsankov 2020 Modelling of vertical spindle head for machining centre / J. Physics: Conf. Series **1553** (2020) 012012. VSPID-2019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1553/1/012012>
40. Oleg Krol, Olga Porkuian, Volodymyr Sokolov, Petko Tsankov. Vibration stability of spindle nodes in the zone of tool equipment optimal parameters/ Comptes rendus de l'Academie bulgare des Sciences, Vol 72, No 11, pp.1546-1556. DOI: <https://doi.org/10.7546/CRABS.2019.11.12>
41. Krol O., Sokolov V. 3D modelling of angular spindle's head for machining centre. *Journal of Physics: Conf. Series*. 2019. 1278, 012002. VSPID-2018. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1278/1/012002>
42. Raschet detalej mashyn na ЭВМ: Ucheb. posobyje dlja mashynostr. Vuzov / D.N. Reshetov, S.A.Shuvalov, V.D.Dudko y dr.; Pod. red. D.N. Reshetova y S.A. Shuvalova. M.: Vissh. shk., 1985. 368 s.
43. Zamryj A.A. Prakticheskyj uchebnyj kurs SAD/CAE АРМ WinMachine. Uchebno-metodycheskoe posobyje. Moskva: Yzd-vo АРМ, 2004. 240 s.
44. Krol O., Shevchenko S., Sukhorutchenko I., Lysenko A. 3D-modeling of the rotary table for tool SVM1F4 with non-clearance worm gearing // TEKA Commision of Motorization and Energetic in Agriculture. Vol. 14. № 1. 2014. Lublin, Poland. P. 126–133.
45. Mitsyk A.V., Fedorovich V.A., Grabchenko A.I. The effect of a shock wave in an oscillating working medium during vibration finishing-grinding processing. *Cutting & Tools in Technological System. Kharkiv: NTU “KPI”*, 2020. Ed. 93. P. 43 – 55. <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2020.93.06>
46. Sokolov V., Porkuian O., Krol O., Baturin Y. (2020) Design Calculation of Electrohydraulic Servo Drive for Technological Equipment. 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. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_8
47. Krol' O.S., Krol' A.A., Burlakov E.Y. Tverdotel'noe modelyrovanye y yssledovanye shpyndel'nogo uzla obrabatyvajushhego centra. Visnyk Nacional'nogo tehničnogo universytetu «HPI». Serija: Novi rishennja v

References

- suchasnyh tehnologijah. Har'kiv: NTU «HPI», 2013. № 16(989). S. 14–18.
18. Mitsyk A.V., Fedorovich V.O., Grabchenko A.I. Mehano-fiziko-himichne modeljuvannja procesu rujnuvannja poverhni detali u vil'nomu abrazivnomu seredovishhi. Rizannja ta instrument v tehnologichnih sistemah: Mizhnar. nauk.-tehn. zb. Kharkiv: NTU «KPI», 2020. Vip. 92. S. 62 – 67. <https://10.20998/2078-7405.2020.92.08>
 19. Krol O.S., Osipov V.I. Modeling of construction spindle's node machining centre SVM1F4 / Comission of Motorization and Power Industry of Agriculture. – OL PAN, 2013, Vol.13, is.3, Lublin, Poland. – P. 108–113
 20. Krol' O.S. Metody y procedury optymizaciyi rezhymov rezanyja. Monografija. Lugansk: Vyd-vo SNU im. V. Dalja, 2013. 260 s.
 21. Krol O., Sokolov V. Rational choice of machining tools using prediction procedures / EUREKA: Physics and engineering, Number 4, 2018. p. 14–20. DOI: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2018.00667>
 22. Krol' O.S., Suhorutchenko Y.A. Trehmerne modelyrovanye mnogooperacyonnogo stanka modely SVM1F4 v srede kompas 3D. Vostochno-Evropejskij zhurnalпередovyh tehnologij. 2014. T. 4. № 7 (70). S. 13–18. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.26250>
 23. Krol' O.S., Krol' A.A. Raschet podatlyvosti stanka SF68VF4 y modelyrovanye dynamyky formoobrazovanyja // Visnyk SevNTU, vyp. 117 «Mashynobuduvannja ta transport», Sevastopol', 2011. S. 81–84
 24. Krol' O.S., Krol' A.A., Syndeeva E.V. Modelyrovanye konstrukcyy chetyrehopornogo vala v SAPR ARM «WinMachine» // Resursozberigajuchi tehnologii' vyrobnyctva ta obrobky tyskom materialiv u mashynobuduvanni. Zb. nauk. pr. Lugansk: SNU im. V. Dalja, 2008. S. 139–143.
 25. Shevchenko S., Mukhovaty A., Krol O. (2020) Gear Transmission with Conic Axoid on Parallel Axes. In: Radionov A., Kravchenko O., Guzeev V., Rozhdestvenskiy Y. (eds) Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). ICIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. pp. 1–10. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-22041-9_1
 26. Krol' O.S. Postroyeniye parametrycheskoy modelej remennyyhperedach s yspol'zovanyem systemy ARM WINMACHINE / Vostochnoevropejskij zhurnalпередovyh tehnologij. 2012. № 2/7(62). S. 61–63.
 27. Krol' O.S., Shevchenko S.V., Sindjejeva O.V., Pokintelycja M.I. Proektuvannja mehanichnyhperedach metalorizal'nyh verstativ za dopomogoju systemy WinMachine. Navchal'nyj posibnyk. Lugansk: Vyd-vo SNU im. V. Dalja, 2007. 200 s.
 28. Krol O, Sokolov V. Research of modified gear drive for multioperational machine with increased load capacity. Diagnostyka. 2020; 21(3):87–93. DOI: <https://doi.org/10.29354/diag/126026>
 29. Nerubashhenko A.A., Krol' O.S., Krol' A.A. Sozdanye bazy dannyh parametrycheskoy modelej detalej stankov v module ARM Base // Visnyk SevNTU, 2010, vyp.107. S.107–109.
 30. Krol O., Sokolov V. Parametric modeling of machine tools for designers. Sofia: Prof. Marin Drinov Academic Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2018. 112 p. DOI: <https://doi.org/10.7546/PMMTD.2018>

Krol O., Golubenko O.L., Slepchenko K.I. Modeling of the structure of a four-support shaft by the stiffness criterion

The means and tools of designing and modeling of multi-support shafts with the use of solid-state modeling and the finite element method in choosing the optimal design of the shaft and its supports are presented. A transverse layout of the drive has been developed, which will determine the nature of the load and the design scheme of the shaft. This shaft is considered as a rod structure on four hinged supports in which the main problem of performance is insufficient rigidity and high stress levels in certain sections. The procedure of development of elastic-deformation model as a set of two independent tasks is considered: statics of a shaft as a rod on elastic supports (calculation of an elastic line of a shaft) and the corresponding characteristics of bearings. The procedure of a three-dimensional model construction on a four-support shaft design for a multi-operation drilling-milling-boring machine in the integrated WinMachine CAD workstation is proposed. Interconnected solid-state modeling modules "ARM Studio" and "ARM Structure3D" were used, as well as a specialized module for designing shafts "ARM Shaft", which are included in the APM WinMachine CAD environment. A specialized parametric core with a very user-friendly interface is used, which provides a sharp increase in the productivity of the designer in the process of modeling machine tool shafts. The calculation of bearing 4-309 was performed using the module "ARM Bear", which is based on a set of verification calculations of non-ideal bearings, including the determination of displacements and force distribution diagrams taking into account statistical dispersion. The multivariate calculation of the elastic-deformation state using the finite element method in the environment of the integrated system of automated design APM WinMachine is considered. The analysis of displacements and angles of rotation in different sections of the shaft on rigid hinged supports and determined that their values are within acceptable limits, which confirms the efficiency of the four-support shaft structure. The maximum stresses that occur in the slotted surface are determined using the "Cross-sectional stress" option. It is shown how the elastic-deformation characteristics change during the transition from rigid to elastic-deformation hinged supports.

Keywords: multi-shaft, metal-cutting machine, 3D model, finite element method, stress diagram, displacement plots.

Кроль Олег Соломонович – к.т.н., доц., професор кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк), krolos.snu.edu@gmail.com

Голубенко Олександр Леонідович – д.т.н., проф., професор кафедри залізничного транспорту, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк) olgol@snu.edu.ua

Слепченко Карина Ігорівна – студ. гр. ПМЕ-20дм факультету інженерії, кафедра машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк) alisakatrine@gmail.com

Стаття подана 01.02.2022 р.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-272-2-42-45>

УДК 621.3.077

АДАПТИВНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ САМООБОРОТНОЇ МЕДОГОНКИ

Логунів О.М.

HONEYCOMB ELECTRIC DRIVE ADAPTIVE CONTROL SYSTEM

Logunov O.M.

Розглянуто сучасний стан типових засобів автоматизації пасік в Україні, показані вимоги до медоконок в цілому та до систем управління їх електроприводом зокрема. Розглянуто декілька існуючих систем керування електроприводом медогонки. Показані їх типові недоліки: використання ненадійних електромеханічних реле, обмежена кількість програм, відсутність систем контролю швидкості обертання барабана та зворотного зв'язку. Розглянуто конструкцію медогонки. Надано диференціальне рівняння руху колекторного двигуна постійного струму. Наведено вираз, що зв'язує момент інерції ротора медогонки та масу меду в стільниках. Запропоновано спосіб моніторингу процесу відкачування меду за допомогою датчика зворотного зв'язку. Наведено вираз для обчислення моменту інерції, порівняння якого з виміряним моментом інерції дасть сигнал про помилку в систему управління. Зазначено, що вимірювання моменту інерції дозволяє визначити початкову кількість меду в рамці і вибрати оптимальні моменти реверсу каруселі, а використання адаптивного алгоритму керування дозволить налаштувати тривалість горизонтальних відрізків на графіку кутової швидкості ротору медогонки та визначити оптимальні моменти реверсування ротора для кожної партії стільників. Отримано графік максимально допустимої частоти обертання каруселі хордальної медогонки в залежності від маси меду в рамках. Наведено порівняльний графік кутової швидкості обертання барабана відцентрової медогонки з оборотними касетами для випадків з використанням стандартної програми відкачування рамок та з адаптивним керуванням процесом відкачування. Запропоновано метод визначення поточної швидкості відкачування, що дозволяє підвищити ефективність контролю відкачки меду та скоротити час обробки стільникових рамок без втрати якості. Запропоновано використання платформи Arduino в якості елементної бази для побудови системи управління. Запропоновано використання датчика Холла для отримання сигналу зворотного зв'язку. Визначено напрями подальших досліджень – визначення коефіцієнтів ПІД-регулятора та визначення оптимальної для даного етапу відкачки швидкості обертання на основі зміни моменту інерції барабана.

Ключові слова: медогонка, момент інерції, датчик, електропривод, ШІМ, ПІД-регулятор, стільник.

Вступ. На даний момент бджільництво є однією з небагатьох галузей, що постійно розвиваються, в Україні загалом і в Луганській області особливо. Обсяги виробництва та експорту меду щорічно зростають [1]. У той же час, на відміну від інших країн – провідних виробників продукції бджільництва, в Україні більша частина меду виробляється дрібними та середніми (20-200 вуликів) пасіками з найрізноманітнішим обладнанням – від ручних хордальних медоконок на 3 рамки з необоротними касетами до радіальних медоконок з електроприводом на кілька десятків сотових рамок.

Останнім часом збільшується поширення медоконок з електроприводом і системами управління. Обладнання характеризується великою різноманітністю. Представлені медогонки з ручним та автоматичним керуванням електроприводом. Лідером на ринку України є продукція компанії «АВВ-100», останні моделі якої комплектуються автоматичною мікропроцесорною системою керування електроприводом та системою синхронного розвороту рамок при зміні напрямку обертання, що дозволяє проводити весь цикл відкачування в автоматичному режимі.

Пропонується електропривод із двигуном постійного струму з напругою живлення 12 або 24 В [2]. Ця система управління має низку недоліків. Схема реверсу двигуна реалізована на електромеханічному реле, які мають низький експлуатаційний ресурс. Кількість програм обмежена. Жодна з програм не має понад 4 стадій роботи. Системи контролю швидкості обертання барабана та зворотного зв'язку відсутні. В останніх версіях додано ручний режим керування. Вибір швидкості обертання та тривалості відкачування відбувається інтуїтивно, без урахування в'язкості та кількості меду в рамках. При цьому надмірна швидкість обертання викликає руйнування рамок, а недостатня тривалість призводить до неповного відкачування меду. Тому цікава система контролю швидкості відкачування безпосе-

редньо під час процесу. Реалізувати таку систему можна на популярній та доступній платформі Ардуїно, якщо встановити датчик швидкості обертання каруселі. Схема такої медогонки представлена на рис. 1.

У статті [3] описано систему управління медогонкою та наведено графік зміни частоти обертання ротора, що забезпечує повне відкачування меду без пошкодження стільникових рамок (рис. 6). Його недоліком є фіксований час відкачування, певний виходячи з найменш сприятливого випадку - крижкі (нові) стільники, заповнені густим медом. При меншому заповненні стільників або меншій в'язкості меду час обробки може бути зменшено.

У роботі [4] пропонується модель системи управління процесом відкачування меду, але розглядається система управління електроприводом без зворотного зв'язку, а розрахунки та експериментальна установка виконані на базі трирамкової хордальної медогонки з необоротними касетами, яка втратила актуальність.

У роботі [5] також розглядається система управління електроприводом без зворотного зв'язку, а розрахунки виконані для малопоширеної радіальної медогонки з горизонтально розташованою віссю.

Метою статті є побудувати математичну модель процесу відкачування для визначення поточної швидкості відкачування, яка дозволить підвищити ефективність управління медогонкою та скоротити час обробки стільникових рамок без втрати якості.

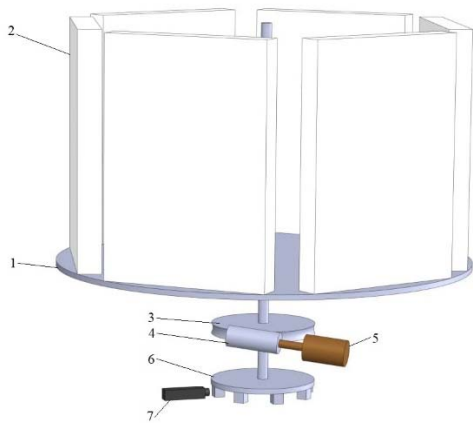


Рис. 1 Схема медогонки (корпус медогонки не показаний)

Опис обладнання. Карусель медогонки 1 утримує рамки з медом 2, які обертаються від електродвигуна 5 через черв'ячну передачу 3 і 4. Системою зворотного зв'язку є закріплений на осі каруселі диск 6 з рівномірно розташованими магнітами та датчик Холла 7.

Математична модель обладнання. Як приклад розглянемо одновимірну систему - електропривод з колекторним двигуном постійного струму (рис. 2), що описується диференціальним рівнянням першого порядку [6]

$$M_g = M_c + J \frac{d\omega}{dt}, \quad (1)$$

де M_g , M_c – моменти крутний і опору; ω – кутова швидкість обертання валу двигуна; t – поточний час; J – момент інерції, приведений до валу двигуна.

$$J = J_0 + \frac{m \cdot R^2 + J_k}{i^2}, \quad (2)$$

де J_0 – момент інерції якоря електродвигуна та черв'яка; m – маса меду в рамках; R – радіус розташування рамок у каруселі; J_k – момент інерції конструктивних елементів каруселі та рамок; i – передавальне число черв'ячного редуктора.

$$i = \frac{z_k}{z_c},$$

де z_k – кількість зубів на черв'ячному колесі; z_c – число заходів черв'яка.

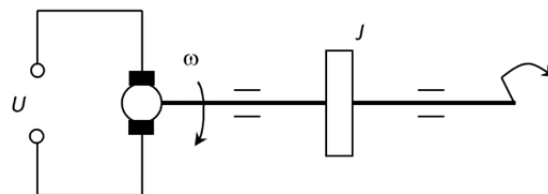


Рис. 2. Схема приводу постійного струму

На якірну обмотку двигуна подається напруга U , номінальна напруга живлення двигуна (рис. 3).

$$\frac{\omega}{\omega_0} = \frac{U}{U_{ном}} - \frac{M_g}{M_p}, \quad (3)$$

де M_p – пусковий момент; $U_{ном}$ – номінальна напруга живлення двигуна, ω_0 – кутова швидкість холостого обертання при $U=U_{ном}$.

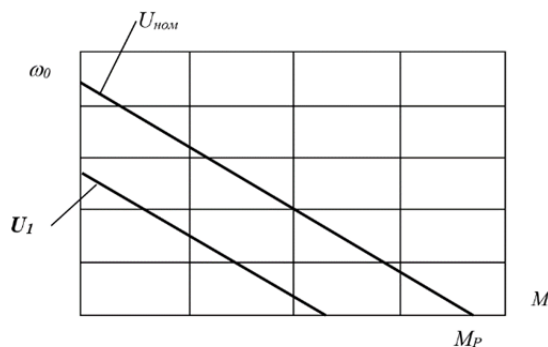


Рис. 3. Механічна характеристика двигуна постійного струму ($U_{ном} > U_1$).

Поєднуючи рівняння (1) - (3), запишемо остаточне рівняння для моделі

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M_p}{J} \left(\frac{U}{U_{ном}} - \frac{\omega}{\omega_0} \right) \quad (4)$$

Кутова швидкість обертання каруселі обмежена міцністю стільників

$$\Omega = \sqrt{\frac{F_{kp}}{m \cdot R}}, \quad (5)$$

Експериментально визначивши, що 60 об/хв витримують без ушкодження всі медові рамки, можна побудувати криву регулювання частоти обертання каруселі у процесі відкачування меду.

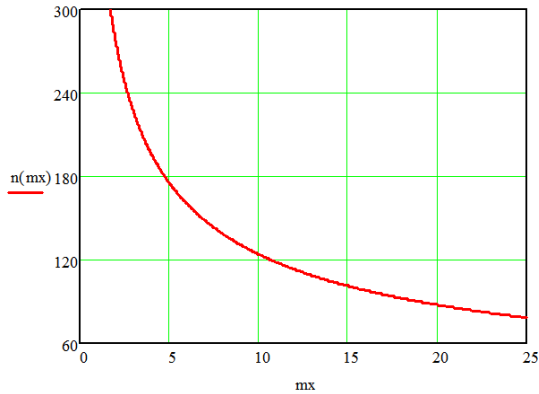


Рис.4. Максимально допустима частота обертання каруселі медогонки в залежності від маси меду в рамках

Виразим масу меду через момент інерції каруселі з формули (2) та отримаємо

$$\Omega = \sqrt{\frac{F_{kp} \cdot R}{i^2 (J - J_0) - J_k}}, \quad (6)$$

Це значення є оптимальним з точки зору продуктивності процесу відкачування.

Поточні значення кутової швидкості та прискорення каруселі можна визначити, використовуючи дискретні відліки часу з датчика Холла

$$\Omega = \frac{d\varphi}{dt} \approx \frac{\varphi_i - \varphi_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} = \frac{\Delta\varphi}{t_i - t_{i-1}} \quad (7)$$

$$\frac{d\Omega}{dt} \approx \frac{2\Delta\varphi(2t_i - t_{i-1} - t_{i+1})}{(t_{i+1} - t_{i-1})(t_i - t_{i-1})(t_{i+1} - t_i)}$$

Поточний момент інерції каруселі можна визначити, використовуючи вираз (4)

$$J = \frac{M_p}{i \left(\frac{d\Omega}{dt} \right)} \left(\frac{U}{U_{ном}} - \frac{i\Omega}{\omega_0} \right) \quad (8)$$

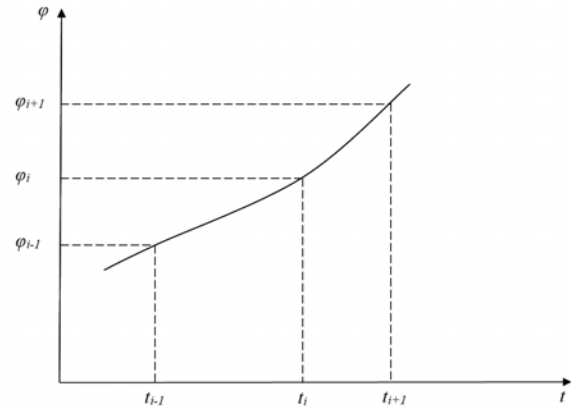


Рис.5. Визначення параметрів обертання за допомогою імпульсного датчика

підставимо отримане значення J формули (6) і обчислимо оптимальне значення Ω_0 , порівняння якого з вимірним дасть сигнал помилки системи управління. Крім того, вимірювання моменту інерції дозволяє визначити початкову кількість меду в рамках і вибрати оптимальні моменти реверсу каруселі.

Типовий графік зміни обертів медогонки показано на рис. 6.

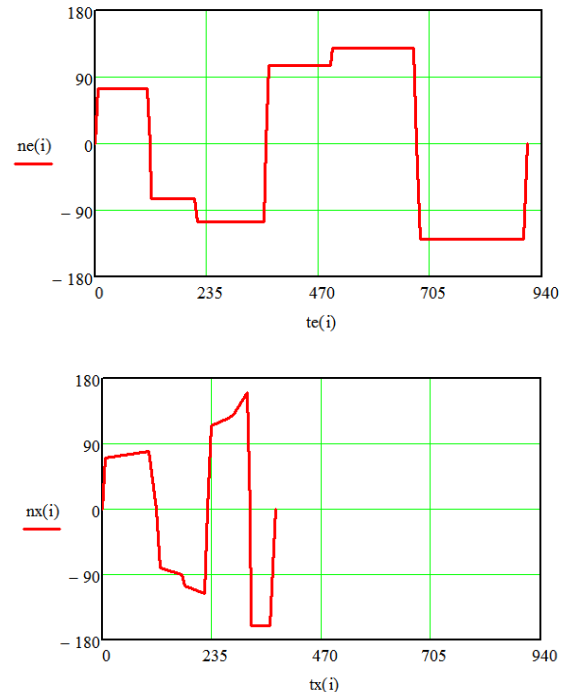


Рис. 6. Графік кутової швидкості обертання барабана відцентрової медогонки з оборотними касетами (вгорі – стандартна програма відкачування рамок, внизу – адаптивне керування процесом відкачування)

Використання адаптивного алгоритму управління дозволяє скоригувати тривалість горизонтальних ділянок на графіку та визначити оптимальні

моменти реверсування ротора медогонки для кожної партії рамок із медом.

Висновки. Побудовано математичну модель процесу відкачування меду. Запропоновано спосіб визначення поточної швидкості відкачування, що дозволяє підвищити ефективність управління медогонкою та скоротити час обробки стільникових рамок без втрати якості.

Напрямки подальших досліджень. Визначення коефіцієнтів ПІД-регулятора. Визначення оптимальної для даного етапу відкачки швидкості обертання на основі зміни моменту інерції барабана.

Л і т е р а т у р а

1. <http://agroportal.ua/news/ukraina/itogi-goda-eksport-ukrainskogo-meda-ustanovil-absolyutnyi-rekord/>.
2. http://avv-100.com.ua/index.php?route=product/category&path=72_114.
3. Логунів О.М. Система управління електроприводом медогонки на платформі Arduino. Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. Науковий журнал. Северодонецьк: СХУ ім.В.Даля. 2021. № 1 (265). С. 60-63.
4. Хорошунів, Николай Геннадиевич. Режим работы электропривода центрифуги для откачки меда из соторамок : диссертация ... кандидата технических наук : 05.20.02 / Хорошунів Николай Геннадиевич; [Место защиты: Кубан. гос. аграр. ун-т]. - Краснодар, 2011. - 144 с.: ил. РГБ ОД, 61 11-5/2162
5. Сыркин, В.А. Обоснование частоты вращения ротора радиальной электрифицированной медогонки с горизонтальной осью вращения / С. И. Васильев, В. А. Сыркин // Известия Самарской ГСХА. – 2016. – №4. – С. 51-54.
6. Попович М.Г. Теорія електропривода: Підручник / М. Г. Попович, М. Г. Борисюк, В. А. Гаврилюк та ін.; За ред. М. Г. Поповича. – К.: Вища шк., 1993. – 494 с.

R e f e r e n c e s

1. <http://agroportal.ua/news/ukraina/itogi-goda-eksport-ukrainskogo-meda-ustanovil-absolyutnyi-rekord/>.
2. http://avv-100.com.ua/index.php?route=product/category&path=72_114.
3. Lohunov O.M. Systema upravlinnya elektropyvodom medohonky na platformi Arduino. Visnyk Shkhidnoukrayins'koho natsional'noho universytetu imeni Volodymyra Dalya. Naukovyy zhurnal. Syevyerodons'k : SNU im.V.Dalya. 2021. № 1 (265). С. 60-63.
4. Khoroshunov, Nikolay Hennadyevych. Rezhym raboty elektropyvoda tsentryfugy dlya otkachky meda yz sotoramok : dyssertatsyya ... kandydata tekhnicheskyykh nauk : 05.20.02 / Khoroshunov Nikolay Hennadyevych; [Mesto zashchyty: Kuban. hos. ahrar. un-t]. - Krasnodar, 2011. - 144 s.: yl. RHB OD, 61 11-5/2162
5. Syrkyn, V. A. Obosnovanye chastoty vrashchenyya rotora radyal'noy elektryfytirovannoy medohonky s horyzontal'noy os'yu vrashchenyya / S. Y. Vasylyev, V. A.

Syrkyn // Yzvestyya Samarskoy HSKHA. – 2016. – №4. – С. 51-54.

6. Popovych M.H. Teoriya elektropyvoda: Pidruchnyk / M. H. Popovych, M. H. Borisyuk, V. A. Havrylyuk ta in.; Za red. M. H. Popovycha. – K.: Vyshcha shk., 1993. – 494 s.

Logunov O.M. Adaptive control system for the electric drive of the honey extractor

Beekeeping in Ukraine is being developed. The export of honey is increasing. The greater part of honey is produced by small and medium sized apiaries. They are hard to mechanize. They continue using the manual honey extractors and manual electric actuator. The popular one is the "ABB-100" company management system. But it has a lot of drawbacks. The relays have a low resource. The amount of programs is limited. There are no control systems. The task of the manual electric extractor control. Honey must be extracted from the honeycomb. The honeycomb must not be damaged. Time should be minimal. The rotation speed must be gradually increased. The direction of rotation changes. At the same time, excessive rotation speed causes the destruction of the frames, and insufficient duration leads to incomplete pumping of honey. Therefore, the pumping speed control system during the process is of interest. You can implement such a system on the popular Arduino platform if you install a carousel rotation speed sensor. Several existing control systems for the electric drive of the honey extractor are considered. It is shown that none of them has feedback. The design of the honey extractor is considered. A differential equation in the motion of a DC collector motor is provided. An expression is presented that relates the moment of inertia of the honey extractor rotor and the mass of honey in the combs. A method for monitoring the pumping process using a feedback sensor is proposed. An expression is given for calculating the moment of inertia. Comparing it with the measured one will give an error signal to the control system. In addition, the measurement of the moment of inertia allows you to determine the initial amount of honey in the frame and choose the optimal moments of the carousel reverse. The use of an adaptive control algorithm will allow you to adjust the duration of the horizontal sections on the graph and determine the optimal moments of reversing the honey extractor rotor for each batch of honeycomb. A method for determining the current pumping speed is proposed, which allows to increase the efficiency of honey extraction control and reduce the processing time of honeycomb frames without loss of quality.

Keywords: honey extractor, moment of inertia, driver, sensor, electric drive, PWM, PID controller, honeycomb.

Логунів Олександр Миколайович – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк), logunov@snu.edu.ua

Стаття подана 31.01.2022 р.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-272-2-46-51>

УДК 624.9.048

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДЕФОРМАЦІЇ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ МАТЕРІАЛУ ДЕТАЛІ ПРИ ОЗДОБЛЮВАЛЬНО-ЗАЧИЩУВАЛЬНІЙ ОБРОБЦІ МЕТАЛЕВИМИ КУЛЬКАМИ НА ОПЕРАЦІЇ ВІБРОПОЛІРУВАННЯ

Міцник А.В.

MATHEMATICAL SIMULATION OF THE DEFORMATION OF THE PART MATERIAL SURFACE LAYER DURING ITS FINISHING AND GRINDING PROCESSING WITH METAL BALLS IN THE VIBRATION POLISHING OPERATION

Mitsyk A.V.

Відзначено, що на операціях віброполірування у якості робочого середовища використовуються металеві поліровані кульки діаметром 4...6 мм, виконані для шарикопідшипникової промисловості зі сталі ШХ15. Описано сутність операції віброполірування та зазначено, що на поверхневому шарі оброблюваної деталі створюється ефект наклепу. Відзначено, що для створення наклепу широко застосовуються такі технологічні способи, як обдування дробом, карбування та ін., в яких використовуються металеві поліровані кульки, твердість яких значно перевищує твердість матеріалу оброблюваної деталі. Відомо, що наклеп утворюється при пластичній деформації поверхневого шару матеріалу деталі. Пластична контактна задача на практиці віброобробки вирішена ще повністю, хоча отримано її часткові рішення. Метою статті є спроба визначення деформованого стану в зоні деформації за умови пластичного контакту металевої кульки робочого середовища та поверхні оброблюваної деталі. Розроблено математичну модель визначення деформації поверхневого шару матеріалу деталі. Дослідження деформації умовно прийняті у циліндричній системі координат. Поставлене завдання вирішується з використанням загальних рівнянь механіки суцільних середовищ та поля швидкостей переміщень. За розмірами пластичного відбитка знайдено глибину наклепу. Також за допомогою методу ліній ковзання, без урахування сил тертя, встановлено зону поширення деформації у радіальному напрямку. Встановлено поле швидкостей течії металу в зоні деформації. Визначено швидкості деформації, а також встановлено інтенсивність цих швидкостей під час деформації в металі оброблюваної деталі. Прийнято, що область деформації змінюється у просторі та часі. Встановлено, що час початку деформації для кожної точки поверхні оброблюваної деталі матиме значення. Доведено, що вогнище деформації можна обмежити еліптичною поверхнею. Отримано вираз у циліндричних координатах, що дозволяє визначити інтенсивність деформації поверхні оброблюваної деталі металевими кульками у будь-який момент часу циклу операції вібраційної оздоблювально-зачищувальної обробки.

Ключові слова: операція віброполірування, поліровані металеві кульки, наклеп, зона деформації,

швидкість руху кульки, поле швидкостей, інтенсивність швидкостей, інтенсивність деформації.

Вступ. Останнім часом на металообробних підприємствах поширена технологія обробки поверхонь деталей методом віброполірування. У якості вільного оздоблювального середовища, що завантажується в резервуар віброверстата, при цьому, як правило, використовуються металеві поліровані кульки діаметром 4...6 мм, виконані для шарикопідшипникової промисловості зі сталі ШХ-15 ГОСТ 3772-81. Ці технології докладно описані класиками методу віброобробки [1, 2].

Сутність операції віброполірування. При операції віброполірування на поверхневому шарі оброблюваної деталі створюється ефект наклепу [3, 4]. Для створення наклепу також широко застосовуються такі технологічні способи, як обдування дробом, карбування та ін., у яких використовується інструмент зі сферичною поверхнею, зокрема металеві поліровані кульки, твердість яких значно перевищує твердість матеріалу оброблюваної деталі [5 – 8].

Відомо, що наклеп утворюється внаслідок пластичної деформації поверхневого шару матеріалу деталі [9]. Пластична контактна задача нині повністю не вирішена, хоча рядом дослідників отримано важливі результати, які дозволяють досягти її часткових рішень.

Метою роботи є спроба визначити деформований стан у зоні деформації за умов пластичного контакту металевої кульки робочого середовища та деформованого напівпростору на поверхні оброблюваної деталі з використанням окремих апіорних результатів [10].

Розробка математичної моделі. Умовно прийmemo дослідження деформації у циліндричній системі координат (рис. 1).

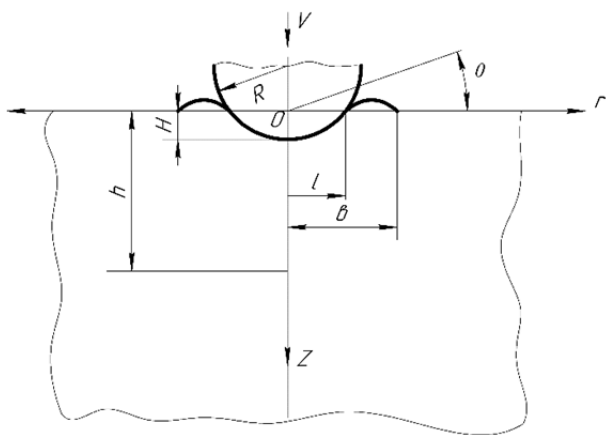


Рис. 1. Схема деформації поверхні в зоні контакту металеві кульки та деталі на операції віброполірування

Поставлену задачу вирішуватимемо з використанням загальних рівнянь механіки суцільних середовищ та поля швидкостей переміщення [11]. Деформований стан знаходимо за умови, що відомо поле швидкостей гранул робочого середовища в вогнищі деформації, гранули якого визначаємо з робіт [12, 13]. Глибину наклепу за розмірами пластичного відбитка знайдемо за формулою (1):

$$h \approx kl, \quad (1)$$

де k – коефіцієнт при степені наклепу, менше ніж 0,5, приблизно дорівнює 3; l – розмір зони впровадження кульки робочого середовища у радіальному напрямку.

Зону поширення деформації в радіальному напрямку, знайдену за допомогою методу ліній ковзання без урахування сил тертя, визначимо з рівності [13]:

$$b = 2l. \quad (2)$$

Можна прийняти гіпотезу, що в силу осової симетрії процесу та відсутності скручування та перекосів у процесі деформації тангенціальна складова швидкості дорівнює нулю, тобто $V_\theta = 0$.

Вертикальну складову V_z представляємо у вигляді творів двох функцій, кожна з яких залежить лише від одного аргументу:

$$V_z = f(r) \varphi(z), \quad (3)$$

де $f(r)$ – функція, що характеризує закон зміни руху частинок металу за координатою r , визначається формою гранули робочого середовища, зоною поширення деформації та формою гребінця навколо лунки, що може бути записано у вигляді:

$$f(r) = V_0 \frac{l}{\pi r} \sin \frac{\pi r}{l}. \quad (4)$$

Через те, що при глибині проникнення гранули робочого середовища, тобто металеві кульки, $H < 0,3R$ то $l \approx \sqrt{2RH}$. Разом з тим, коли $H = V_0 t$, отримаємо $l = \sqrt{2RV_0 t}$.

Тепер вираз (4) набуде виду:

$$f(r) = \frac{V_0 \sqrt{2RV_0 t}}{\pi r} \sin \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0 t}}, \quad (5)$$

де t – час деформування; V_0 – швидкість руху кульки робочого середовища.

Функція $\varphi(z)$ характеризує закон згасання за координатою z . На підставі експериментальних досліджень розподілу деформацій за глибиною методом мікротвердості та з урахуванням рівняння (1) ця функція може бути представлена у виді:

$$\varphi(z) = \left(1 - \frac{z}{k \sqrt{2RV_0 t}} \right)^2. \quad (6)$$

Складову швидкості V_z визначаємо з рівняння нерозривності:

$$\frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_r}{r} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0. \quad (7)$$

Поле швидкостей течії металу в зоні деформації має наступний вид:

$$\begin{aligned} V_z &= V_0 \frac{\sqrt{2RV_0 t}}{\pi r} \sin \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0 t}} \left(1 - \frac{z}{k \sqrt{2RV_0 t}} \right)^2; \\ V_r &= 2V_0 \frac{\sqrt{2RV_0 t}}{\pi^2 k r} \left(1 - \frac{z}{k \sqrt{2RV_0 t}} \right) \times \\ &\quad \times \left(1 - \cos \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0 t}} \right); \\ V_\theta &= 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Визначення швидкостей деформації та їх інтенсивності в металі оброблюваної деталі. Знаючи поле швидкостей переміщення матеріальних частинок, визначаємо швидкості деформації згідно з диференціальними співвідношеннями:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{zz} &= \frac{\partial V_z}{\partial z}; \quad \varepsilon_{rr} = \frac{\partial V_r}{\partial r}; \quad \varepsilon_{\theta\theta} = \frac{V_r}{r}; \\ \varepsilon_{zr} &= \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{\partial V_r}{\partial z}; \quad \varepsilon_{r\theta} = 0; \quad \varepsilon_{\theta z} = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{zz} &= -\frac{2V_0}{\pi V_r} \left(1 - \frac{z}{k\sqrt{2RV_0t}} \right) \sin \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t}}; \\
\varepsilon_{rr} &= -\frac{2V_0\sqrt{2RV_0t}}{\pi^2 k r^2} \left(1 - \frac{z}{k\sqrt{2RV_0t}} \right) \left(1 - \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t}} \sin \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t}} - \cos \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t}} \right); \\
\varepsilon_{\theta\theta} &= \frac{2V_0\sqrt{2RV_0t}}{\pi^2 k r^2} \left(1 - \frac{z}{k\sqrt{2RV_0t}} \right) \left(1 - \cos \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t}} \right); \\
\varepsilon_{zr} &= \frac{V_0\sqrt{2RV_0t}}{\pi r^2} \left(1 - \frac{z}{k\sqrt{2RV_0t}} \right)^2 \left(\frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t}} \cos \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t}} - \sin \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t}} \right) - \frac{2V_0}{\pi^2 k^2 r} \left(1 - \cos \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t}} \right); \\
\varepsilon_{r\theta} &= 0; \quad \varepsilon_{\theta z} = 0.
\end{aligned} \tag{10}$$

Використовуючи рівняння (8) і роблячи зазначені у співвідношеннях (9) дії, отримуємо наступні вирази для швидкостей деформацій (10).

Далі визначаємо інтенсивність швидкостей деформації в металі оброблюваної деталі.

Інтенсивність швидкостей деформації можна визначити, використовуючи вираз, який у цьому випадку має вид:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{rr})^2 + (\varepsilon_{rr} - \varepsilon_{\theta\theta})^2 + (\varepsilon_{\theta\theta} - \varepsilon_{zz})^2 + \frac{3}{2} \varepsilon_{zr}^2} \tag{11}$$

Визначення складових деформації у матеріалі оброблюваної деталі. Складові деформації зазвичай визначаються через складові швидкостей деформації:

$$\begin{aligned}
e_{zz} &= \int_{t_0}^t \varepsilon_{zz} dt; \quad e_{rr} = \int_{t_0}^t \varepsilon_{rr} dt; \quad e_{\theta\theta} = \int_{t_0}^t \varepsilon_{\theta\theta} dt; \\
e_{zr} &= \int_{t_0}^t \varepsilon_{zr} dt; \quad e_{r\theta} = 0; \quad e_{\theta z} = 0.
\end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned}
e_{zz} &= \frac{\sqrt{2RV_0t}(2z - k\sqrt{2RV_0t})}{\pi k^2 r R} \sin \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t}} - \frac{\sqrt{2RV_0t}}{kR} \cos \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t}} - \\
&\quad - \frac{\pi r}{kR} \int_{t_0}^t \frac{\sin \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t}} \left(-\frac{1}{2} \frac{\pi r}{(\sqrt{2RV_0t})^{3/2}} \right) dt}{\frac{\pi r}{(\sqrt{2RV_0t})^{1/2}}} - \frac{2\pi z}{k^2 R} \int_{t_0}^t \frac{\cos \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t}} \left(-\frac{1}{2} \frac{\pi r}{(\sqrt{2RV_0t})^{3/2}} \right) dt}{\frac{\pi r}{(\sqrt{2RV_0t})^{1/2}}} - \\
&\quad - \frac{\sqrt{2RV_0t_0}(2z - k\sqrt{2RV_0t_0})}{\pi k^2 r R} \sin \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t_0}} + \frac{\sqrt{2RV_0t_0}}{kR} \cos \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t_0}};
\end{aligned} \tag{15}$$

Через те, що область деформації змінюється у просторі та в часі, то час початку деформації для кожної точки матиме своє значення. Експериментально доведено, що вогнище деформації можна обмежити еліптичною поверхнею з півосями:

$$a = k\sqrt{2RV_0t}; \quad b = 2\sqrt{2RV_0t}. \tag{13}$$

На цій поверхні величина деформації дорівнює нулю, а час початку деформації знайдемо із рівняння цієї поверхні:

$$t_0 = \frac{4z^2 + k^2 r^2}{8k^2 RV_0}. \tag{14}$$

В результаті інтегрування виразів у часі отримаємо такі складові її деформацій:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{rr} = & \frac{4kRV_0t - 3z\sqrt{2RV_0t}}{3\pi k^2 r R} \sin \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t}} + \frac{2\pi^2 k r^2 + 2k(\sqrt{2RV_0t})^3 - 6zRV_0t}{3\pi^3 k^2 r^2 R} \cos \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t}} + \\
& + \frac{2\pi r}{3kR} \int_{t_0}^t \frac{\sin \frac{\pi r}{\sqrt{(2RV_0t)^{1/2}} \left(-\frac{1}{2} \frac{\pi r}{(\sqrt{2RV_0t})^{3/2}} \right) dt}}{\frac{\pi r}{(\sqrt{2RV_0t})^{1/2}}} + \frac{\pi z}{k^2 R} \int_{t_0}^t \frac{\cos \frac{\pi r}{\sqrt{(2RV_0t)^{1/2}} \left(-\frac{1}{2} \frac{\pi r}{(\sqrt{2RV_0t})^{3/2}} \right) dt}}{\frac{\pi r}{(\sqrt{2RV_0t})^{1/2}}} - \\
& - \frac{2V_0t_0(2k\sqrt{2RV_0t_0} - 3z)}{3\pi^2 k^2 r^2} - \frac{4kRV_0t_0 - 3z\sqrt{2RV_0t_0}}{3\pi k^2 r R} \sin \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t_0}} + \frac{2V_0t_0(2k\sqrt{2RV_0t_0} - 3z)}{3\pi^2 k^2 r^2} - \\
& - \frac{2\pi^2 k r^2 \sqrt{2RV_0t_0} + 2k(\sqrt{2RV_0t_0})^3 - 6zRV_0t_0}{3\pi^2 k^2 r^2 R} \cos \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t_0}};
\end{aligned} \tag{16}$$

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{\theta\theta} = & \frac{2V_0t(2k(\sqrt{2RV_0t} - 3z))}{3k^2 \pi^2 r^2} + \frac{6zRV_0t + k\pi^2 r^2 \sqrt{2RV_0t} - 2k(\sqrt{2RV_0t})^3}{3k^2 \pi r R} \cos \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t}} + \\
& + \frac{2kRV_0t - 3z\sqrt{2RV_0t}}{3k^2 \pi r R} \sin \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t}} + \frac{2\pi r}{6kR} \int_{t_0}^t \frac{\sin \frac{\pi r}{(\sqrt{2RV_0t})^{1/2} \left(-\frac{1}{2} \frac{\pi r}{(\sqrt{2RV_0t})^{3/2}} \right) dt}}{\frac{\pi r}{(\sqrt{2RV_0t})^{1/2}}} + \\
& + \frac{\pi z}{k^2 R} + \int_{t_0}^t \frac{\cos \frac{\pi r}{(\sqrt{2RV_0t})^{1/2} \left(-\frac{1}{2} \frac{\pi r}{(\sqrt{2RV_0t})^{3/2}} \right) dt}}{\frac{\pi r}{(\sqrt{2RV_0t})^{1/2}}} - \frac{3z2RV_0t_0 + k\pi^2 r^2 \sqrt{2RV_0t_0} - 2k(\sqrt{2RV_0t_0})^3}{3k^2 \pi^2 r^2 R} \times
\end{aligned} \tag{17}$$

$$\begin{aligned}
& \times \cos \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t_0}} - \frac{2V_0t_0(2k\sqrt{2RV_0t_0} - 3z)}{3k^2 \pi^2 r^2} - \frac{2kRV_0t_0 - 3z\sqrt{2RV_0t_0}}{3k^2 \pi r R} \sin \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t_0}}; \\
\varepsilon_{zz} = & \frac{(3 + \pi^2 k^2)2RV_0t - 3k\pi^2 z \sqrt{2RV_0t}}{3k^2 \pi^2 R r} \cos \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t}} - \\
& - \frac{\left[(3 + \pi^2 k^2)r^2 + 3z^2 \right] \sqrt{2RV_0t} + k^2 (\sqrt{2RV_0t})^3 - 6kzRV_0t}{3\pi k^2 r^2 R} \sin \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t}} + \\
& + \frac{(3 + \pi^2 k^2)r}{3k^2 R} \int_{t_0}^t \frac{\cos \frac{\pi r}{\sqrt{(2RV_0t)^{1/2}} \left(-\frac{1}{2} \frac{\pi r}{\sqrt{(2RV_0t)^{3/2}}} \right) dt}}{\frac{\pi r}{\sqrt{(2RV_0t)^{1/2}}}} - \frac{\pi z}{kR} \int_{t_0}^t \frac{\sin \frac{\pi r}{\sqrt{(2RV_0t)^{1/2}} \left(-\frac{1}{2} \frac{\pi r}{\sqrt{(2RV_0t)^{3/2}}} \right) dt}}{\frac{\pi r}{(\sqrt{2RV_0t})^{1/2}}} -
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -\frac{2V_0t}{\pi^2k^2r} + \frac{2V_0t}{\pi^2k^2r} - \frac{(3+\pi^2k^2)2RV_0t_0 - 3k\pi^2z\sqrt{2RV_0t_0}}{3k^2\pi^2Rr} \cos \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t_0}} + \\
& + \frac{\left[(3+\pi^2k^2)r^2 + 3z^2 \right] \sqrt{2RV_0t_0} + k^2 \left(\sqrt{2RV_0t_0} \right)^3 - 6kzRV_0t_0}{3\pi k^2r^2R} \sin \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t_0}}.
\end{aligned} \quad (18)$$

Вираз інтенсивності деформації у матеріалі оброблюваної деталі. Інтенсивність деформації можна визначити з виразу, який у циліндричних координатах має вид:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{rr})^2 + (\varepsilon_{rr} - \varepsilon_{\theta\theta})^2 + (\varepsilon_{\theta\theta} - \varepsilon_{zz})^2 + \frac{3}{2} \varepsilon_{zr}^2}. \quad (19)$$

Висновки

Таким чином, використовуючи наведені залежності, можна відтворити просторову картину розподілу деформацій в металі при обробці деталі на операції віброполірування металевими кульками в будь-який момент часу циклу операції вібраційної оздоблювально-зачищувальної обробки.

Література

1. Карташов И.Н., Шаинский М.Е., Власов В.А. Обработка деталей свободными абразивами в вибрирующих резервуарах. Киев: Вища школа, 1975. 188 с.
2. Бабичев А.П., Бабичев И.А. Основы вибрационной технологии. Ростов-на-Дону, 2008. 694 с.
3. Kundrák J., Morgan M., Mitsyk A.V., Fedorovich V.A. The effect of the shock wave of the oscillating working medium in a vibrating machine's reservoir during a multi-energy finishing-grinding vibration processing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 106, p. 4339 – 4353 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04844-2>
4. Мицык А.В., Федорович В.А. Развитие новых технологий вибрационной отделочно-зачистной и упрочняющей обработки деталей общемашиностроительного применения. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: нові рішення в сучасних технологіях. Харків, НТУ «ХПІ», 2012. № 47 (953). С. 226 – 233.
5. Николаенко А.П. Формирование поверхности изделия при вибрационной обработке. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2010. № 2 (58). С. 167 – 181.
6. Носко П.Л., Калмыков М.О., Николаенко А.П., Лубенська Л.М. Застосування вібраційної обробки для підвищення якості виробів: монографія. СХУ ім. В. Даля. Луганськ: Ноулідж, 2009. 292 с.
7. Кріль О.С. Методы и процедуры динамики шпиндельных узлов: монография. Луганск: ВНУ им. В. Даля, 2014. 154 с.
8. Кріль О.С. Параметрическое моделирование металло-режущих станков и инструментов: монография. Луганськ: СХУ ім. В. Даля, 2012. 116 с.
9. Калмыков М.О., Шумакова Т.О., Струтинський В.Б., Лубенська Л.М. Інструмент для обробки деталей вільними абразивами. Київ – Луганськ: «Ноулідж», 2010. 214 с.

References

10. Mamalis, A.G., Grabchenko, A.I., Mitsyk, A.V., Fedorovich, V.A., Kundrák, J. Mathematical simulation of motion of working medium at finishing – grinding treatment in the oscillating reservoir. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 70, p. 263 – 276 (2014). <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5257-6>
11. Алексеев Ю.Н., Борисевич В.К., Коваленко П.И. Теоретические исследования деформационного состояния при внедрении сферического индентора в полупространство. *Импульсная технология обработки металлов давлением*. Вып. 5. Харьков: ХАИ, 1975. с. 112 – 116.
12. Алексеев Ю.Н. Введение в теорию обработки металлов давлением, прокаткой и резанием. Харьков: ХГУ, 1969. 108 с.
13. Кудрявцев И.В. Основы выбора режима упрочняющего поверхностного наклепа ударным способом. *Повышение долговечности деталей машин методом поверхностного наклепа*. Вып. 108. Москва: Машиностроение, 1965. с. 6 – 35.
1. Kartashov I.N., Shainskij M.E., Vlasov V.A. Obrabotka detalej svobodnymi abrazivami v vibriruyushchih rezervuarah. Kiev: Vishcha shkola, 1975. 188 s.
2. Babichev A.P., Babichev I.A. Osnovy vibracionnoj tekhnologii. Rostov-na-Donu, 2008. 694 s.
3. Kundrák J., Morgan M., Mitsyk A.V., Fedorovich V.A. The effect of the shock wave of the oscillating working medium in a vibrating machine's reservoir during a multi-energy finishing-grinding vibration processing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 106, p. 4339 – 4353 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04844-2>
4. Mitsyk A.V., Fedorovich V.A. Razvitie novyh tekhnologij vibracionnoj otdelochno-zachistnoj i uprochnyayushchej obrabotki detalej obshchemashinostroitel'nogo primeneniya. Visnik NTU «KhPI». Seriya: novi rishennya v suchasnykh tekhnologiyah. Kharkiv, NTU «KhPI», 2012. № 47 (953). S. 226 – 233.
5. Nikolaenko A.P. Formirovanie poverhnosti izdeliya pri vibracionnoj obrabotke. Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnologiyah. 2010. № 2 (58). S. 167 – 181.
6. Nosko P.L., Kalmykov M.O., Nikolaienko A.P., Lubenska L.M. Zastosuvannya vibratsiinoi obrobky dlia pidvyshchennia yakosti vyrobiv: monohrafiia. SNU im. V. Dalia. Luhansk: Noulidzh, 2009. 292 s.
7. Krol O.S. Metody i procedury dinamiki shpindel'nyh uzlov: monografiya. Lugansk: VNU im. V. Dalia, 2014. 154 s.
8. Krol O.S. Parametricheskoe modelirovanie metallo-rezhushchih stankov i instrumentov: monografiya. Lugansk: SNU im. V. Dalia, 2012. 116 s.
9. Kalmykov M.O., Shumakova T.O., Strutynskiy V.B., Lubenska L.M. Instrument dlia obrobky detalei vil'nymy abrazivamy. Kyiv – Luhansk: «Noulidzh», 2010. 214 s.

10. Mamalis, A.G., Grabchenko, A.I., Mitsyk, A.V., Fedorovich, V.A., Kundrák, J. Mathematical simulation of motion of working medium at finishing – grinding treatment in the oscillating reservoir. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 70, p. 263 – 276 (2014). <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5257-6>
11. Alekseev Yu.N., Borisevich V.K., Kovalenko P.I. Teoreticheskie issledovaniya deformatsionnogo sostoyaniya pri vnedrenii sfericheskogo indentora v poluprostranstvo. Impul'snaya tekhnologiya obrabotki metallov davleniem. Vyp. 5. Kharkov: KhAI, 1975. s. 112 – 116.
12. Alekseev Yu.N. Vvedenie v teoriyu obrabotki metallov davleniem, prokatkoj i rezaniem. Kharkov: KhGU, 1969. 108 s.
13. Kudryavcev I.V. Osnovy vybora rezhima uprochnyayushchego poverhnostnogo naklepa udarnym sposobom. Povyshenie dolgovechnosti detalej mashin metodom poverhnostnogo naklepa. Vyp. 108. Moskva: Mashinostroenie, 1965. s. 6 – 35.

Mitsyk A. Mathematical simulation of the deformation of the part material surface layer during its finishing and grinding processing with metal balls in the vibration polishing operation

It is noted that polished metal balls with a diameter of 4...6 mm, made for the ball bearing industry from 100Cr6 (DIN 17230-1980) steel, are used as a working medium in vibration polishing operations. The nature of the vibration polishing operation is described and it is indicated that the effect of surface cold working is created on the surface layer of the processed part. It is noted that such technological methods as blowing with shot, caulking and others are widely used to create work hardening. In this operation the metal polished balls, the hardness of which significantly exceeds the hardness of the material of the processed part, are used. It is known that work hardening is formed during plastic deformation of the part material surface layer. The plastic contact problem in the practice of vibration treatment has not yet been fully solved, but its partial solutions have been obtained. The purpose of

the article is an attempt to determine the state of strain in the deformation zone under the condition of plastic contact between the metal ball of the working medium and the surface of the processed part. A mathematical model has been developed for determining the deformation of the part material surface layer. Deformation studies are conventionally accepted in a cylindrical coordinate system. The problem posed is solved using the general equations of continuum mechanics and the velocity field displacements. The depth of work hardening was determined from the dimensions of the plastic imprint. Also, using the slip line method, without taking into account friction forces, the zone of deformation propagation in the radial direction was established. The field of metal flow velocities in the deformation zone is established. The strain rates are determined, and the intensity of these rates during deformation in the metal of the processed part is established. It is assumed that the deformation zone varies in space and time. It has been established that the start time of deformation for each point of the processed part surface will have its own value. It is proved that the deformation zone can be limited by an elliptical surface. As a result, an expression in cylindrical coordinates is obtained. It allows one to determine the intensity of deformation of the processed part surface by metal balls at any time of the cycle of the vibration finishing and grinding processing.

Keywords: vibration polishing operation, polished metal balls, work hardening, deformation zone, ball motion speed, velocity field, velocity intensity, deformation intensity

Міщук Андрій Володимирович – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк), an.mitsyk@gmail.com

Стаття подана 01.02.2021 р.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-272-2-52-61>

УДК 621.9.025.11

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ПОВЕРХНІ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ВІБРАЦІЙНІЙ ОБРОБЦІ

Ніколаєнко А.П., Шумакова Т.О.

RESEARCH OF THE PROCESS OF FORMING SURFACE OF PARTS DURING VIBRATING PROCESSING

Nikolaïenko A.P., Shumakova T.O.

У статті представлені результати дослідження впливу вібраційної обробки на верстатах з U-подібною формою контейнера на процес формування поверхневого шару деталей, розглянуті параметри шорсткості поверхні та їх вплив на якість виробів машинобудування. Найбільш важливі експлуатаційні властивості деталей машин, а саме зносостійкість, контактна жорсткість, щільність з'єднань та міцність посадок значною мірою залежать від їх контактної взаємодії: характеру контакту, зближення, фактичної площі контакту та динамічних характеристик стиків поверхонь. На контактну взаємодію впливають геометричні характеристики обробленої поверхні. Для вирішення завдання забезпечення необхідних експлуатаційних властивостей слід знати залежності, що пов'язують характеристики якості поверхонь, що обробляються, з умовами обробки, причому залежності повинні відображати вплив технологічної спадковості. В статті представлені експериментальні дослідження, метою яких було встановлення залежності між режимами й часом вібраційної обробки та процесом формування поверхневого шару виробів. Для цього було проведено порівняння параметрів шорсткості поверхні зразків зі сталей 20, 40Х та У8 після різних методів обробки, а саме: після чорнового, чистового точіння та після вібраційної обробки. Експериментальні дослідження показали покращення якісних параметрів шорсткості поверхні після застосування вібраційної обробки, збільшення опорної площі поверхні зразків, збільшення несучої здатності профілю. Такі зміни сприятливо позначаються на контактній взаємодії, збільшенні адсорбційної здатності, що важливо при підготовці поверхонь під захисні покриття та загальному поліпшенні експлуатаційних характеристик деталей машин. В результаті застосування вібраційної обробки відбувалось значне збільшення середнього радіусу заокруглення виступів в середньому у 18,3 рази, збільшення середнього кроку нерівностей в середньому у 2,24 рази, зростання опорної довжини профілю в середньому у 2,6 рази, що веде до збільшення площі контакту сполучених поверхонь та підвищенню зносостійкості до 15...20 %.

Ключові слова: вібраційна обробка, експлуатаційні властивості, шорсткість поверхні, опорна довжина профілю, радіус заокруглення нерівностей.

Вступ. Сучасний розвиток техніки супроводжується не тільки форсуванням робочих процесів та підвищенням напруженості елементів конструкції, але й одночасним посиленням вимог до якості та надійності при безперервному скороченні часу на розробку та створення нових виробів [1 – 4]. Це істотно ускладнює процес забезпечення необхідних експлуатаційних властивостей машин, що випускаються.

Вироби машинобудівної промисловості характеризуються конструкторськими та технологічними властивостями. Ці властивості визначають експлуатаційні характеристики виробу, а саме: його якість та надійність. Надійність виробу (вузла, агрегату, системи) обумовлюється його безвідмовністю, ремонтопридатністю, збереженістю, довговічністю та ін. Забезпечення надійності виробів є одним з найважливіших завдань [5 – 8]. Управління конструкторськими рішеннями щодо забезпечення експлуатаційних властивостей є складним завданням, оскільки ці рішення залежать від вимог замовника, від поставлених перед конструктором завдань, проте вплинути на експлуатаційні властивості виробів можливо і потрібно за допомогою вибору технологічних методів їх забезпечення.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень [9 – 14] показують, що на експлуатаційні властивості деталей машин значно впливає якість їх робочих поверхонь. Щоб забезпечити ту чи іншу експлуатаційну властивість деталі або вузла, що виготовляється, необхідно забезпечити необхідні характеристики якості оброблюваних поверхонь.

Постановка проблеми. Для забезпечення надійності виробу крім оснащення процесів його створення сучасним обладнанням, інструментом, пристосуваннями, системами контролю слід розробляти директивні технології з виділенням процесів, що вимагають спеціальних режимів та прийомів обробки, а також досліджувати та усувати негативний спадковий вплив технології шляхом вибору раціональних методів та режимів обробки, пошуку нових методів обробки, у тому числі, застосуванням зміцнюючої обробки. Для вирішення завдання забезпечення необхідних експлуатаційних властивостей слід знати залежності, що пов'язують характеристики якості поверхонь, що обробляються з умовами обробки, причому залежності повинні відображати вплив технологічної спадковості.

Аналіз досліджень і публікацій. Експлуатаційні показники роботи машин багато в чому залежать від зносостійкості матеріалів, з яких вони виготовлені. Зносостійкість характеризується здатністю поверхневих шарів деталі чинити опір руйнуванню при терті ковзання та кочення, а також при мікропереміщеннях, обумовлених впливом вібрацій [7].

Вишукування матеріалів та методів зміцнення, що забезпечують максимальну зносостійкість деталей та мінімальну інтенсивність зносу, є основним питанням у галузі тертя та зносу [15].

Найбільш важливі експлуатаційні властивості деталей машин (зносостійкість, контактна жорсткість, щільність з'єднань та міцність посадок) значною мірою залежать від їх контактної взаємодії (характери контакту, зближення, фактичної площі контакту та динамічних характеристик стиків поверхонь) [16, 17]. Особливо це стосується машин, що працюють за умов тертя. На контактну взаємодію впливають геометричні характеристики обробленої поверхні [9, 18, 19].

На зносостійкість впливають як висота нерівностей, так і їх напрямок, способи формування поверхневого шару та його фізико-механічні властивості [6, 13, 20 – 22]. Важливою геометричною характеристикою є і напрямок нерівностей після механічної обробки різанням, яка значно і по-різному впливає на зношування при тому самому значенні шорсткості поверхні. Найбільш зносостійкими виявляються поверхні з однаковою мікрогеометрією у всіх напрямках [23, 24]. Такі поверхні одержують при обробці ППД вільними абразивами. Мікрорельєф поверхонь після ППД вільними абразивами являє собою хаотичне розташування мікрОВиступів і мікрОВпадин різної конфігурації. Такі поверхні називають матовими. Утворення матових поверхонь обумовлено короткочасною ударно-ріжучою дією безлічі абразивних частинок, що стикаються з оброблюваною поверхнею. При масовому впливі абразивних зерен всі матеріали мають високорозвинену поверхню з великою питомою площею без будь-яких спрямованих рисок, що надає цій поверхні цінних властивостей [24 – 27]. Одним із методів

обробки ППД є вібраційна обробка деталей у U-подібних контейнерах без закріплення.

При вивченні мікрорельєфу поверхонь значний інтерес представляють якісні характеристики, так як з робіт [9 – 11] відомо, що поверхні з однаковою висотою нерівностей, але отримані різними методами, можуть по-різному чинити опір дії сил, що прагнуть стиснути виступи. Такі поверхні поділяються за величинами їх опорних площ. Однак поверхні можуть мати однакові опорні площі, але їх контактна жорсткість може все-таки відрізнятися. Це пов'язано з різними геометричними характеристиками окремих мікронеровностей (кутами нахилу профілю, радіусами закруглення вершин нерівностей та інших.) та його розташуванням по висоті перерізу. Так, при гостроверхніх нерівностях несуча поверхня мала, при плосковершинних – зростає [28].

Для оцінки несучої здатності шорсткості використовують: криву опорної поверхні t_p , побудовану у відносних координатах, параметри її початкової ділянки ν та b , середні радіуси виступів Q_{cp} , локальних виступів, западин, безрозмірний комплекс Δ [11, 28].

За розташуванням опорних кривих і значенням їх параметрів проводять порівняння несучої здатності шорсткості поверхонь, оброблених різними методами і з різною величиною R_a [28]. Найчастіше, при традиційних методах обробки фактична площа контакту становить незначну частину від номінальної. Основна увага щодо опорних поверхонь має бути звернена на розгляд початкових ділянок опорних кривих [28]. У роботах авторів [28, 29] цю частину кривої є рівнянням

$$t = \varepsilon b^V,$$

де b та V – параметри, що залежать від виду обробки; ε – відносна відстань від лінії виступів,

$$\varepsilon = \frac{y}{R_{\max}},$$

де y – відстань від лінії виступів до розглянутого рівня.

Значення ν та b при певному методі механічної обробки і класі чистоти дозволяють підрахувати відносну опорну площу при заданому зближенні.

Кожному виду обробки відповідають свої значення ν та b [28]. У межах кожного виду обробки спостерігається цілком певна закономірність: що вищий клас чистоти, то менше значення ν і більше значення b .

Як відомо, втомна міцність – це здатність деталей машин чинити опір руйнуванню протягом певного проміжку часу при дії на них знакозмінних навантажень. Численними дослідженнями [6, 9, 29, 31, 32] встановлено, що осередки руйнування деталей машин від втоми металу зароджуються їх по-

верхні. Виходячи з цього, міцність втоми деталей машин значною мірою повинна визначатися шорсткістю їх поверхонь і фізико-механічними характеристиками поверхневого шару [7, 19, 29].

Що менше шорсткість поверхні, то вище втомна міцність деталей [19, 29]. Нерівності, що утворюються на поверхні, є концентраторами напруг і є однією з причин зниження втомної міцності. Напруги на дні рисок у 2...2,5 рази перевищують середню величину напруг поверхневого шару. Причому концентрація напруг залежить не тільки від глибини рисок, а й від їхньої форми. Зниження шорсткості особливо позначається на збільшенні міцності втоми деталей з високоміцних легированих сталей [33].

Якщо для збільшення зносостійкості поверхонь тертя доцільно залишати систему канавок від попередньої обробки для збільшення їх маслоємності, то при роботі деталей в втомну міцність, необхідно проводити їх полірування до повного зникнення слідів попередньої обробки – це очевидне протиріччя [10 – 12, 16]. Зносостійкість, як і міцність втоми, є важливими експлуатаційними характеристиками, якими необхідно забезпечити деталям машин для підвищення їх надійності і збільшення терміну служби, отже необхідно запропонувати метод обробки, який задовольняв би вимогам одночасного забезпечення даних експлуатаційних показників. Для цього необхідно усунути з поверхні спрямовані сліди обробки, але водночас надати їй маслоутримуючу здатність.

Враховуючи специфічні особливості обробки вільними абразивами, що призводять до отримання рівномірної шорсткості поверхні, відсутності температурних дефектів та відсутності розтягуючих залишкових напруг, слід очікувати значного підвищення міцності втоми оброблених деталей.

Контактна жорсткість визначає здатність поверхневих шарів деталей, що у контакті, чинити опір дії сил, які прагнуть їх деформувати. Контактна жорсткість впливає на точність роботи приладів, на точність установки деталей у пристосуваннях, на верстатах, на точність обробки та збирання деталей, тобто якість машинобудівних виробів. Контактна жорсткість значною мірою залежить від якості поверхонь деталей, що сполучаються і, отже, від технології їх виготовлення.

Отже, експлуатаційні показники оброблених поверхонь визначаються фізичним станом поверхневого шару та його мікрорельєфом [1, 7 – 10]. Що стосується аналізу стану поверхонь, після застосування абразивної обробки без жорсткого кінематичного зв'язку оброблюваної деталі зі верстатом та інструментом – робочим середовищем, то вони мають численні переваги в порівнянні з поверхнями, обробленими лезовим інструментом.

До методів абразивної обробки деталей без жорсткого кінематичного зв'язку оброблюваної деталі з робочим середовищем-інструментом та верстатом належить досить поширений спосіб обробки – вібраційна обробка. Перевагами ВіО є простота

технологічного обладнання, низька собівартість, можливість одночасної обробки великої кількості деталей складної просторової форми, ефективність при підвищенні якості поверхневого шару виробів.

Мета досліджень. Метою експериментального дослідження було встановлення залежності між режимами й часом вібраційної обробки та процесом формування поверхневого шару виробів. Для цього було проведено порівняння параметрів шорсткості поверхні після різних методів обробки, а саме: після чорнового, чистового точіння та після вібраційної обробки. В якості зразків використовувались заготовки зі сталі 20, 40Х та вуглецевої сталі У8, у кількості 40 од. кожної марки сталі. Зразки були у вигляді роликів із зовнішнім діаметром 50 мм, внутрішнім діаметром 10 мм та товщиною 10 мм.

Поверхні 20 зразків були оброблені чорновим точінням, а поверхні ще 20 зразків – чистовим точінням із параметрами шорсткості, наведеними у табл. 1.

Таблиця 1

Параметри шорсткості поверхні зразків зі сталі У8, сталі 20, сталі 40Х після різних способів підготовки до експерименту

Спосіб підготовки зразка	Матеріал зразка	Параметр шорсткості, мкм		
		R_a , мкм	R_p , мкм	R_{max} , мкм
Точіння чорнове	У8	7,69	8,22	45,7
	Сталь 20	7,25	13,25	61,5
	Сталь 40Х	3,48	11,45	32,0
Точіння чистове	У8	0,94	3,56	8,4
	Сталь 20	2,06	8,57	26,9
	Сталь 40Х	2,61	13	23,5

В ході експерименту група, що складається з 10 зразків після чорнового точіння та 10 зразків після чистового точіння, піддавалася вібраційному шліфуванню на верстаті УВІ-25 протягом 60 хв. Наступна група зразків, що також складається з 10 зразків, оброблених чорновим точінням і 10 зразків, оброблених чистовим точінням, піддавалася вібраційному шліфуванню на верстаті УВІ-25 протягом 120 хвилин.

Після чого зразки піддавалися вібраційному поліруванню на верстаті ВМІ-1003 протягом 30, 60 та 120 хвилин за наступною схемою. Зразки після вібраційного шліфування протягом 60 і 120 хвилин, у кількості по 3 зразки кожного виду полірувалися в робочому середовищі зі сталевих кульок протягом 30 хвилин. Така сама кількість зразків полірувалася протягом 60 і 120 хвилин.

Після обробки з поверхні зразків записували 3...5 профілактограм, які оброблялися в обчислювальному комплексі.

Візуально поверхні зразків відізнялися в залежності від способу отримання. У групи зразків зі сталей 20, 40Х і У8, оброблених чорновим точінням,

спостерігалися на поверхні всіх зразків ризику, як сліди від різця.

Після віброшліфування поверхня набула матового відтінку, проте залишилися ризику від попередньої обробки.

Після віброполірування поверхня була повністю матовою.

Зразки тих же марок сталей, оброблених чистовим точінням, мали на поверхні спрямовані сліди інструменту.

Після віброшліфування та віброполірування поверхня мала рівномірний матовий відтінок.

На основі параметрів шорсткості поверхні, отриманих з профілактограм, була оцінена мікрогеометрія поверхневого шару зразків. Для цього на підставі аналізу факторів, що впливають на експлуатаційні властивості виробів, були обрані наступні параметри: середньоарифметичне відхилення профілю, максимальна висота нерівності, максимальна висота виступу, середній крок нерівності, відносна крива опорна профілю t_p на рівні 33 %.

Розглянемо вплив часу та способу фінішної обробки на середнє арифметичне відхилення профілю та максимальну висоту виступу (табл. 2, 3).

Як, видно, з таблиць 2 – 3 відбулося значне зменшення параметрів R_a , R_p на зразках, оброблених чорновим точінням. Це пояснюється тим, що в процесі вібраційної обробки, крім зішліфування під час операції віброшліфування, відбувалося змінання вершин мікронерівностей у процесі віброполірування.

Таблиця 2

Вплив тривалості віброшліфування та віброполірування на параметри шорсткості зразків із сталі У8, сталі 20, сталі 40Х, попередньо оброблених чорновим точінням

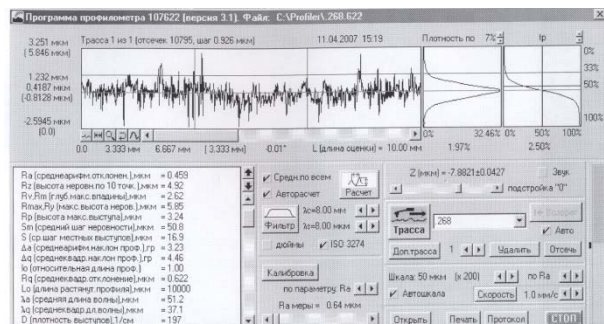
Матеріал зразка	Час віброшліфування, хв	Час віброполірування, хв	Параметри шорсткості, мкм		
			R_a	R_p	R_{max}
Сталь У8	60	30	2,3	6,54	20,45
		60	1,8	5,77	16,87
		120	1,36	3,25	10,75
	120	30	2,15	3,63	18,5
		60	1,11	3,37	15,64
		120	1,02	2,79	9,39
Сталь 20	60	30	4,00	9,6	40,35
		60	2,51	8,47	28,07
		120	2,31	5,09	20,67
	120	30	3,04	9,47	38,00
		60	2,89	7,44	20,05
		120	2,05	4,5	16,8
Сталь 40Х	60	30	2,68	7,93	20,08
		60	1,44	4,7	11,02
		120	1,39	4,37	9,25
	120	30	1,57	5,91	18,09
		60	1,25	4,34	10,52
		120	1,13	3,6	8,43

Також з аналізу профілактограм, отриманих на профілометри-профілографі з інформаційно-обчислювальним комплексом (рис. 1), проводилося порівняння середнього кроку профілю S_m , а також відносної опорної довжини профілю t_p , що є відношенням опорної довжини профілю до базової довжини. Середній крок нерівностей профілю S_m свідчить про збільшення основ окремих нерівностей, а отже, радіусів їх закруглення. Результати вимірювань залежно від способу та часу обробки представлені у табл. 4 – 6.

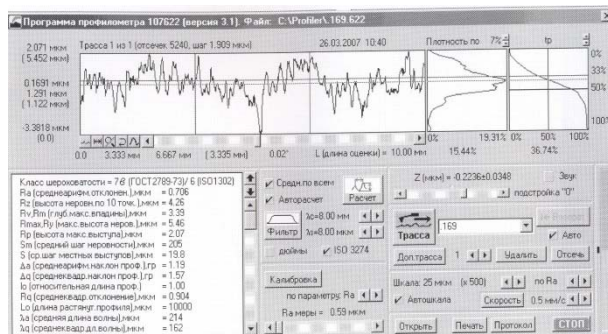
Таблиця 3

Вплив тривалості віброшліфування та віброполірування на параметри шорсткості зразків зі сталі У8, сталі 20, сталі 40Х, попередньо оброблених чистовим точінням

Матеріал зразка	Час віброшліфування, хв	Час віброполірування, хв	Параметри шорсткості, мкм		
			R_a	R_p	R_{max}
У8	60	120	0,8	2,71	6,5
	120		0,6	2,25	5,37
Сталь 20	60	120	1,8	5,83	7,31
	120		1,12	3,30	8,27
Сталь 40Х	60	120	1,18	3,98	7,93
	120		1,11	3,9	7,67



а



б

Рис. 1. Приклад профілограми поверхні зразку зі сталі У8 після різних методів обробки:

а – після точіння; б – після вібраційної обробки

Таблиця 4

Параметри шорсткості поверхні зразків зі сталі У8, сталі 20, сталі 40Х після різних способів підготовки до експерименту

Спосіб підготовки зразка	Матеріал зразка	Параметр шорсткості, мкм	
		Крок нерівностей, S_m , мкм	Відносна опорна довжина профілю, t_p , мкм
Точіння чорнове	У8	96,2	15,36
	Сталь 20	311	21,79
	Сталь 40Х	178,5	38,11
Точіння чистове	У8	50,8	9,48
	Сталь 20	137,5	24,62
	Сталь 40Х	130	7,51

Таблиця 5

Вплив тривалості віброшліфування та віброполірування на параметри шорсткості зразків із сталі У8, сталі 20, сталі 40Х, попередньо оброблених чорновим точінням

Матеріал зразка	Час віброшліфування, хв	Час віброполірування, хв	Параметри шорсткості, мкм	
			S_m	t_p
Сталь У8	60	30	187	27,49
		60	293	34,40
		120	384	57,18
	120	30	266	16,46
		60	271	32,06
		120	281	43,33
Сталь 20	60	30	400	53,68
		60	531,5	58,89
		120	684,5	75,77
	120	30	409	30,93
		60	611	41,75
		120	698	88,48
Сталь 40Х	60	30	209,5	37,01
		60	324	45,49
		120	460	68,14
	120	30	265	32,20
		60	292	32,44
		120	314	40,78

За даними порівняльного аналізу видно зростання крокових параметрів шорсткості та відносної опорної кривої профілю залежно від виду та часу віброобробки, що свідчить про позитивний вплив на геометричні показники обробленої поверхні.

Разом з тим, оцінка по опорній довжині профілю не дає достатньо повного уявлення про опорну площу. Тому для повнішої оцінки зміни опорних площ зразків після застосування вібраційної обробки були додатково розраховані наступні показники: параметри початкової ділянки кривої опорної поверхні ν та b , середній радіус ви-

ступів шорсткості Q_{cp} . Визначення середнього радіуса мікронерівностей проводилося за формулою [18]:

$$Q_{cp} = \frac{9Ra^2 Sm^2}{128(Rp - 0,5Ra)^3},$$

Таблиця 6

Вплив тривалості віброшліфування та віброполірування на параметри шорсткості зразків із сталі У8, сталі 20, сталі 40Х, попередньо оброблених чистовим точінням

Матеріал зразка	Час віброшліфування, хв	Час віброполірування, хв	Параметри шорсткості, мкм	
			S_m	t_p
У8	60	120	230	21,3
	120		244	36,74
Сталь 20	60	120	292,5	31,72
	120		308	41,41
Сталь 40Х	60	120	291	19,59
	120		316,5	27,35

Що стосується параметра опорної кривої ν , то експериментальні дослідження підтвердили висновки, зроблені авторами [18, 28] про те, що зі зменшенням шорсткості та збільшенням опорної площі зменшується даний показник. А саме: для зразків із сталі У8 після попередньої обробки значення становило 1,4...1,9, а після вібраційної обробки знаходилося в межах 0,6...0,8.

Параметр ν для зразків із сталі 20 до вібраційної обробки приймав середнє значення 1,5, а після вібраційного шліфування та полірування змінювався до 0,9.

Аналогічно спостерігалось зміна ν і для зразків зі сталі 40Х з 1,7 ... 1,4 після попередньої обробки до 0,4 ... 0,9 після вібраційної залежно від часу обробки.

Середній радіус виступів шорсткості Q_{cp} є однією з найважливіших характеристик при розрахунку контактної жорсткості, яка визначає здатність поверхневих шарів деталей, що знаходяться в контакт, чинити опір дії сил, які прагнуть їх деформувати [20]. Контактна жорсткість впливає на точність роботи приладів, на точність установки деталей у пристосуваннях, на верстатах, на точність обробки та збирання деталей, тобто якості машинобудівних виробів. Значення контактної жорсткості важливо і при виготовленні відповідальних деталей з мікронною точністю, а також при визначенні фактичної площі торкання, знання якої необхідно для ро-

зрахунку сил тертя, оцінки впливу способу обробки поверхонь на зношування деталей, підбору зносостійких пар тертя, розрахунку міцності сполучень з нерухомими посадками, розрахунку густини з'єднань.

Математична обробка результатів досліджень [20] з використанням множинного кореляційного аналізу показує, що між параметрами контактної жорсткості і характеристиками якості поверхонь, що сполучаються, є тісний зв'язок. Контактна жорсткість переважно визначається значенням поверхневої мікротвердості і геометричними характеристиками – R_a , R_z , радіусами закруглення вершин нерівностей, параметрами хвилястості.

Контактна жорсткість також залежить від середнього кроку нерівностей S_m , шорсткості R_a та відносної опорної довжини профілю. Результати обчислень радіусів кривизни вершин нерівностей представлені таблицях 7 – 9.

У зразків зі сталі У8 після чорнового точіння і подальшої вібраційної обробки протягом двох годин серед АН-2 і двох годин полірування у середовищі сталевих кульок спостерігалось зниження шорсткості поверхні R_a на 87 %, максимальної висоти нерівностей профілю R_{max} – на 80 %. У зразків після чистового точіння та подальшої вібраційної обробки протягом 4 годин параметр R_a знизився на 20%, а R_{max} на 36%. Відбувалося зниження висоти максимального виступу R_p в 2,9 рази для зразків після попереднього чорнового точіння, що пройшли операції вібраційного шліфування та полірування, та в 1,58 рази для зразків після попереднього чистового точіння. Середній крок нерівностей S_m для зразків після чистового та чорнового точіння та подальшої вібраційної обробки збільшився відповідно у 4,8 та у 2,93 рази. Відбувалося збільшення відносної опорної довжини профілю t_p для зразків після чистового та чорнового точіння та подальшої вібраційної обробки відповідно у 3,87 та у 2,63 рази.

Таблиця 7

Параметри шорсткості поверхні зразків після різних способів підготовки до експерименту

Спосіб підготовки	Матеріал зразка	Середній радіус мікронерівностей Q_{cp} , мкм
Точіння чорнове	У8	34,85
	Сталь 20	248,923
	Сталь 40Х	32,044
Точіння чистове	У8	30,74
	Сталь 20	13,366
	Сталь 40Х	7,71

Таблиця 8

Вплив тривалості віброшліфування та віброполірування на параметри шорсткості зразків зі сталі У8, сталі 20, сталі 40Х, попередньо оброблених чорним точінням

Матеріал зразка	Час віброшліфування, хв	Час віброполірування, хв	Середній радіус мікронерівностей Q_{cp} , мкм
Сталь У8	60	30	196,661
		60	264,990
		120	440,987
	120	30	183,258
		60	483,888
		120	789,475
Сталь 20	60	30	705,900
		60	1099,046
		120	1029,535
	120	30	279,476
		60	1060,453
		120	1432,773
Сталь 40Х	60	30	37,743
		60	217,281
		120	248,001
	120	30	123,193
		60	328,156
		120	332,724

Таблиця 9

Вплив тривалості віброшліфування та віброполірування на параметри шорсткості зразків зі сталі У8, сталі 20, сталі 40Х, попередньо оброблених чистим точінням

Матеріал зразка	Час віброшліфування, хв	Час віброполірування, хв	Середній радіус мікронерівностей Q_{cp} , мкм
У8	60	120	168,221
	120		428,919
Сталь 20	60	120	184,08
	120		249,278
Сталь 40Х	60	120	222,696
	120		296,220

Спостерігалось значне збільшення середнього радіусу заокруглення виступів шорсткості, а саме для групи зразків після чорнового точіння та вібраційної обробки цей показник збільшується у 22,65 рази, у групи зразків після чистового точіння – у 13,92 рази після застосування операцій вібраційного шліфування та полірування. У зразків зі сталі 20 після чорнового точіння, і наступної вібраційної обробки протягом двох годин серед АН-2 і двох годин полірування серед сталевих кульок спостерігалось зниження шорсткості поверхні R_a в

3,5 разу, максимальної висоти нерівностей профілю $R_{\max}$ – на 73 %. У зразків після чистового точіння та подальшої вібраційної обробки протягом 4 годин параметр R_a знизився в 1,8 разів, а $R_{\max}$ – на 70 %. Відбувалося зниження висоти максимального виступу R_p для зразків після чорнового та чистового точіння, що пройшли операції вібраційного шліфування та полірування, відповідно у 2,89 та у 2,59 рази.

Середній крок нерівностей S_m для зразків після чистового та чорнового точіння, і подальшої вібраційної обробки збільшився відповідно у 2,24 та у 2,24 рази. Відбувалося збільшення відносної опорної довжини профілю t_p для зразків після чорнового і чистового точіння після подальшої вібраційної обробки відповідно у 4,06 та у 1,68 рази.

Також спостерігається значне збільшення радіусу скруглення виступів шорсткості поверхні, а саме для групи зразків після чорнового точіння та вібраційної обробки – у 5,76 разів, а для групи зразків після чистового точіння та вібраційної обробки – у 18,65 разів.

У зразків із сталі 40X після чорнового точіння та подальшої вібраційної обробки протягом двох годин у середовищі АН-2 та двох годин полірування у середовищі сталевих кульок спостерігалось зниження шорсткості поверхні R_a у 3,52 рази, найбільшої висоти нерівностей профілю $R_{\max}$ – на 74 %. У зразків після чистового точіння та подальшої вібраційної обробки протягом 4 годин параметр R_a знизився в 2,35 разів, а $R_{\max}$ – на 67 %.

Відбувалося зниження висоти максимального виступу R_p для зразків після чорнового та чистового точіння, що пройшли операції вібраційного шліфування та полірування відповідно у 3,18 та у 2,43 рази.

Середній крок нерівностей S_m для зразків після чистового та чорнового точіння після вібраційної обробки збільшився відповідно у 2,43 рази та у 2,57 рази. Відбувалося збільшення відносної опорної довжини профілю t_p для зразків після чорнового і чистового точіння після подальшої вібраційної обробки відповідно в 364 і в 178 рази. Спостерігалось значне збільшення радіусу заокруглення виступів шорсткості поверхні, а саме для групи зразків після попереднього чорнового точіння – у 10,38 рази, а для групи зразків після попереднього чистового точіння – у 38,42 рази. Проведені експериментальні дослідження свідчать про зменшення параметра опорної кривої ν після вібраційної обробки, що свідчить про збільшення опорної площі поверхні зразків, що пройшли вібраційне шліфуван-

ня та полірування. Також це свідчить про збільшення радіусу заокруглення вершин нерівностей біля поверхонь після вібраційної обробки.

Висновки.

1. Вібраційна обробка забезпечує суттєве зниження шорсткості поверхні залежно від часу обробки та незалежно від початкового стану обробленої поверхні, не менш ніж на 2 класи, без зміни верстату, його амплітудно-частотних характеристик та робочого середовища.

2. При вібраційній обробці відбувається зминання вершин шорсткості, зростає опорна довжина профілю на рівні 10 ... 40 % в середньому в 2,6 рази, збільшуються радіуси вершин виступів в середньому в 18,3 рази, що веде до збільшення площі контакту сполучених поверхонь та підвищенню зносостійкості до 15...20 %.

3. Позитивна зміна якісних параметрів шорсткості поверхні після застосування вібраційної обробки свідчить про створення нового мікрорельєфу поверхні деталі, який характеризується збільшенням несучої здатності профілю, що сприятливо позначається на контактній взаємодії, збільшенням адсорбційної здатності, що важливо при підготовці деталей під захисні покриття та загальним поліпшенням експлуатаційних характеристик.

Література

1. Krol O.S., Osipov V.I. Modeling of construction spindle's node machining centre SVM1F4/Commission of Motorization and Power Industry of Agriculture. OL PAN, 2013, Vol.13, is.3, Lublin, Poland. P. 108–113
2. Krol O., Juravlev V. Modeling of spindle for turret of the specialized tool type SF16MF3 // *TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture*. OL PAN, 2013, Vol.13, № 4, Lublin, Poland. P. 141–147.
3. Krol O., Sukhorutchenko I. 3D-modeling and optimization spindle's node machining centre SVM1F4 // *TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture*. Vol.13. № 3. 2013. Lublin, Poland. P. 114–119.
4. Ніколаєнко А.П. Методи підвищення експлуатаційних властивостей виробів / А.П. Ніколаєнко, Ю.Ю. Дегтярьова, М.О. Калмиков, Л.М. Лубенська // *Машинознавство*. 2007. Вип. №4. С.33 – 43.
5. Krol O., Sokolov V., Tsankov P. Modeling of vertical spindle head for machining center. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020, No. 1553. 012012. – VSPID-2019. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1553/1/012012>
6. Кроль О.С., Кроль А.А., Бурлаков Е.И. Твердотельное моделирование и исследование шпиндельного узла обрабатывающего центра. *Вісник Національного технічного університету «ХП»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. Харків: НТУ «ХП», 2013. № 16 (989). С. 14–18.
7. Кроль О.С. Параметрическое моделирование металлорежущих станков и инструментов. Монография. Луганськ: ЧУ ім. В. Даля, 2012. 116 с.
8. Sokolov, V.: Transfer functions for shearing stress in non-stationary fluid friction. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019)*.

- ICIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 1, pp. 707-715. Springer, Cham (2020).
9. Sokolov, V.: Hydrodynamics of Flow in a Flat Slot with Boundary Change of Viscosity. In: Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 2, pp. 1172-1181. Springer, Cham (2021).
 10. Nikolaenko A.P. Increasing of details surface quality by vibrating processing. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*, вип. 2 (226), с. 60 – 69, 2016.
 11. Міщук А.В. Розвиток процесів обробки вільним абразивним середовищем в коливних резервуарах і формування їх фізико-технологічних можливостей. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*, вип. 4 (260), с. 55 – 65, (2020). DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-260-4-55-65>
 12. Суслов А.Г. Технология машиностроения: учебник. — М.: КНОРУС, 2013. — 336 с.
 13. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки компрессора вентилятора. Часть I / Богуслаев В.А., Муравченко Ф.И., Жеманюк П.Д. и др. Запорожье: ООО «Мотор Сич», 2003. 396 с.
 14. Mitsyk A.V., Fedorovich V.A., Grabchenko A.I. Interaction of the abrasive medium with the treated surface and the process of metal removal during vibration treatment in the presence of a chemically active solution. *Cutting & Tools in Technological System*. Kharkiv, NTU "KhPI", 2021. № 94. С. 42 – 48. DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2021.94.05>
 15. Технологические возможности вибрационной обработки деталей на станках с U-образной формой контейнера / И.В. Волков, Ю.Ю. Дегтярева, М.А. Калмыков, А.П. Николаенко // *Вісник Харківського національного технічного університету сільськогосподарства ім. П. Василенко «Технологічний сервіс АПК, техніка та технології у сільськогосподарському машинобудуванні»*. 2006. Вип. 42. С. 167 – 173.
 16. Барандич К.С. Технологічне забезпечення циклічної довговічності деталей при їх токарному обробленні: автореф. дис. на здоб. наук. ступеня канд. техн. наук / Барандич Катерина Сергіївна; МОН України, Нац. техн. ун-т України "КПІ імені І. Сікорського". Київ, 2018. 22 с.
 17. Качество машин: справочник в 2 т. / Под ред. Суслова А.Г. М.: Машиностроение, 1995. Т.2. / А.Г. Суслов, Ю.В. Гуляев, А.М. Дальский и др. 1995. 430 с.
 18. Рыжов Э.В. Контактная жесткость деталей машин / Рыжов Э.В. М. "Машиностроение", 1966. 193 с.
 19. Бабичев А.П. Физико-технологические основы методов обработки: учебное пособие для вузов / Бабичев А.П. Ростов н/Д: «Феникс», 2006. 410 с.
 20. Харламов Ю.А. Основы технологии восстановления и упрочнения деталей машин / Харламов Ю.А., Будагьянц Н.А. Луганск: ВНУ им. В. Даля, 2003. 496 с.
 21. Mitsyk A.V., Fedorovich V.A., Grabchenko A.I. Main technological factors determining the efficiency and quality of the vibration process. *Cutting & Tools in Technological System*. Kharkiv, NTU "KhPI", 2022. № 96. С. 131 – 137. DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2022.96.14>
 22. Дахнюк О.П. Технологічне забезпечення зносостійкості робочих поверхонь спряжених деталей машин на операціях механічного оброблення: автореф. дис. на здоб. наук. ступеня канд. техн. наук / Дахнюк Олександр Петрович; МОН України, Луцький нац. техн. ун-т. Луцьк, 2017. 21 с.
 23. Проволоцкий А.Е. Формирование развитых микрорельефов поверхностей / А.Е. Проволоцкий, С.П. Лапшин, С.Л. Негруб, В.М. Ласкин // *Резание и инструмент в технологических системах*. 2004. Вып.66. С. 153 – 162.
 24. Бабичев А.П. Основы вибрационной технологии / Бабичев А.П. – Ростов н/Д: ДГТУ, 1999. 624 с.
 25. Отделочно-упрочняющая обработка деталей многоконтактным виброударным инструментом / А.П. Бабичев, П.Д. Мотренко, И.А. Бабичев и др. Ростов н/Д: ДГТУ, 2003. 192 с.
 26. Подольский М.А. Оценка эффективности упрочнения деталей динамическими методами ППД на основе энергетического критерия: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Подольский Максим Александрович. Ростов н/Д, 2005. 146 с.
 27. Mamalis, A.G., Grabchenko, A.I., Mitsyk, A.V., Fedorovich, V.A., Kundrák, J. Mathematical simulation of motion of working medium at finishing – grinding treatment in the oscillating reservoir. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 70, p. 263 – 276 (2014). DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5257-6>
 28. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей машин и их соединений / Суслов А.Г., Федоров В.П., Горленко О.А. и др. М.: Машиностроение, 2006. 448 с.
 29. Рыжов Э.В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин / Рыжов Э.В. Киев: Наук. думка, 1984. 271 с.
 30. Mamalis A.G., Mitsyk A.V., Fedorovich V.A. Kundrák J. Development of modular machine design and technologies of dynamic action for finishing-grinding treatment by an oscillating abrasive medium. *Journal of Machining and Forming Technologies*, Vol. 7 (1-2), p. 1 – 10, (2015).
 31. Харламов Ю.А. Физика, химия и механика поверхности твердого тела: учебное пособие / Харламов Ю.А., Будагьянц Н.А. Луганск: ВУТУ, 2000. 624 с.
 32. Опальчук А.С. Теоретичні та технологічні основи підвищення контактної втомлювальної міцності сталей / А.С. Опальчук // *Вібрації в техніці та технологіях*. 2004. №3. С. 31 – 34.
 33. Копылов Ю.Р. Виброударное упрочнение / Ю.Р. Копылов. – Воронеж: ВИМВД, 1999. 384 с.

References

1. Krol O.S., Osipov V.I. Modeling of construction spindle's node machining centre SVM1F4/Commission of Motorization and Power Industry of Agriculture. OL PAN, 2013, Vol.13, is.3, Lublin, Poland. P. 108–113
2. Krol O., Juravlev V. Modeling of spindle for turret of the specialized tool type SF16MF3 // *TEKA Com. Mot. and Energ. in Agriculture*. OL PAN, 2013, Vol.13, № 4, Lublin, Poland. P. 141–147.
3. Krol O., Sukhorutchenko I. 3D-modeling and optimization spindle's node machining centre SVM1F4 // *TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture*. Vol.13. № 3. 2013. – Lublin, Poland. P. 114–119.
4. Nikolaenko A.P. Metody pidvyshchennya ekspluatatsiynykh vlastyvostey vyrobiv/A.P. Nikolaenko, Yu.Yu. Dehtyar'ova, M.O. Kalmikov, L.M. Lubens'ka // *Mashynoznavstvo*. 2007. Vip. №4. S.33 – 43.
5. Krol O., Sokolov V., Tsankov P. Modeling of vertical spindle head for machining center. *Modeling of Physics: Conference Series*. 2020, No. 1553. 012012. VSPID-2019. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1553/1/012012>

6. Krol O.S., Krol A.A., Burlakov E.I. Tverdotelnoe modelirovanie i issledovanie shpindel'nogo uzla obrabatyvayushchego tsentra. *Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu «HPI»*. Seriya: Novi rishennya v suchasniyakh tekhnologiyah. Harkiv: NTU «HPI», 2013. # 16(989). S. 14–18.
7. Krol O.S. Parametricheskoe modelirovanie metalorezhushchih stankov i instrumentov. Monografiya. Lugansk: SNU im. V. Dalya, 2012. 116 s.
8. Sokolov, V.: Transfer functions for shearing stress in non-stationary fluid friction. In: Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). ICIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 1, pp. 707-715. Springer, Cham (2020).
9. Sokolov, V.: Hydrodynamics of Flow in a Flat Slot with Boundary Change of Viscosity. In: Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 2, pp. 1172-1181. Springer, Cham (2021).
10. Nikolaenko A.P. Increasing of details surface quality by vibrating processing. *Visnyk Shidnoukrai'ns'kogo natsional'nogo universytetu imeni Volodymyra Dajla*, vyp. 2 (226), s. 60 – 69, 2016.
11. Mitsyk A.V. Rozvytok procesiv obrobky vil'nym abrazyvnym seredovyschem v kolyvnykh rezervuarakh i formuvannja i'h fizyko-tehnologichnykh mozhlyvostej. *Visnyk Shidnoukrai'ns'kogo natsional'nogo universytetu imeni Volodymyra Dajla*, vyp. 4 (260), c. 55 – 65, (2020). DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-260-4-55-65>
12. Suslov A.H. Tekhnolohiya mashynobuduvannya: pidruchnyk - M.: KNORUS, 2013. – 336 s.
13. Tekhnolohichne zabezpechennya ekspluatatsiynykh kharakterystyk detaley VMD. Lopatky kompresora ventyl'yatora. Chastyna I / Bohuslayev V.A., Muravchenko F.I., Zhemanyuk P.D. ta in - Zaporizhzhya: TOV «Motor Sich», 2003. – 396 s.
14. Mitsyk A.V., Fedorovich V.A., Grabchenko A.I. Interaction of the abrasive medium with the treated surface and the process of metal removal during vibration treatment in the presence of a chemically active solution. *Cutting & Tools in Technological System*. Kharkiv, NTU "KhPI", 2021. № 94. C. 42 – 48. DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2021.94.05>
15. Tekhnolohichni mozhlyvosti vibratsiynoyi obrobky detaley na verstatakh iz U-podibnoyu formoyu konteynera / I.V. Volkov, Yu.Yu. Dehtyar'ova, M.A. Kalmykov, A.P. Nikolayenko // *Visnyk Kharkivs'koho natsional'nogo tekhnichnogo universytetu sil's'koho hospodarstva im. P. Vasylenko "Tekhnolohichnyy servis APK, tekhnika ta tekhnolohiyi v sil's'kohospodars'komu mashynobuduvanni"*. - 2006. - Vip. 42. - S. 167 - 173.
16. Barandych K.S. Tekhnolohichne zabezpechennya tsyklichnoyi dovhovichnosti detaley pry yikh tokarniy obrobtsi: avtoref. dys. na zdob. nauk. stupenya kand. tekhn. nauk / Barandych Kateryna Serhiyivna; MON Ukrainy, Nats. tekhn. un-t Ukrainy "KPI imeni I. Sikors'koho". – Kyiv, 2018. – 22 s.
17. Yakist' mashyn: dovidnyk u 2 t. / [Pid red. Suslov A.H.]. M.: Mashynobuduvannya, 1995. T.2. / A.H. Suslov, Yu.V. Hulyayev, A.M. Dal's'kyy ta in. – 1995. – 430 s.
18. Ryzhov E.V. Kontaktna zhorstkist' detaley mashyn/Ryzhov E.V. M. "Mashynobuduvannya", 1966. 193 s.
19. Babichov A.P. Fizyko-tehnolohichni osnovy metodiv obrobky: navchal'nyy posibnyk dlya vuziv / Babichov O.P. - Rostov n / D: "Feniks", 2006. – 410 s.
20. Kharlamov Yu.A. Osnovy tekhnolohiyi vidnovlennya ta zmitsnennya detaley mashyn / Kharlamov Yu.A., Budah'yants N.A. Luhans'k: SNU im. V. Dalya, 2003. 496 s.
21. Mitsyk A.V., Fedorovich V.A., Grabchenko A.I. Main technological factors determining the efficiency and quality of the vibration process. *Cutting & Tools in Technological System*. Kharkiv, NTU "KhPI", 2022. № 96. C. 131 – 137. DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2022.96.14>
22. Dakhnyuk O.P. Tekhnolohichne zabezpechennya znosostiynosti robochykh poverkhon' spryazhenykh detaley mashyn na operatsiyakh mekhanichnoho obroblennya: avtoref. dys. na zdob. nauk. stupenya kand. tekhn. nauk / Dakhnyuk Oleksandr Petrovych; MON Ukrainy, Luts'kyy nats. tekhn. un-t. Luts'k, 2017. 21 s.
23. Provolots'kyy A.Ye. Formuvannya rozvynenykh mikrorel'yefiv poverkhon' / A.Ye. Provolots'kyy, S.P. Lapshyn, S.L. Nehrub, V.M. Laskin // *Rizannya ta instrument u tekhnolohichnykh systemakh*. 2004. Vyp. 66. S. 153 - 162.
24. Babichov A.P. Osnovy vibratsiynoyi tekhnolohiyi / Babichov A.P. Rostov n / D: DDTU, 1999. – 624 s.
25. Ozdoblyval'no-zmitsnyuyucha obrobka detaley bahatokontaktnym vibroudarnym instrumentom / [A.P. Babychiv, P.D. Motrenko, I.A. Babychev ta in.]. - Rostov n / D: DDTU, 2003. - 192 s.
26. Podil's'kyy M.A. Otsinka efektyvnosti zmitsnennya detaley dynamichnymi metodamy PPD na osnovi enerhetychnoho kryteriyu: dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.02.08 / Podil's'kyy Maksym Oleksandrovych. Rostov n / D, 2005. 146 s.
27. Mamalis, A.G., Grabchenko, A.I., Mitsyk, A.V., Fedorovich, V.A., Kundrák, J. Mathematical simulation of motion of working medium at finishing – grinding treatment in the oscillating reservoir. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 70, p. 263 – 276 (2014). DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5257-6>
28. Tekhnolohichne zabezpechennya ta pidvyshchennya ekspluatatsiynykh vlastyvostey detaley mashyn ta yikh z'yednan' / Suslov A.H., Fedorov V.P., Horlenko O.O. ta in M.: Mashynobuduvannya, 2006. 448 s.
29. Ryzhov E.V. Tekhnolohichni metody pidvyshchennya znosostiynosti detaley mashyn/Ryzhov E.V. Kyiv: Nauk. dumka, 1984, 271 s.
30. Mamalis A.G., Mitsyk A.V., Fedorovich V.A. Kundrák J. Development of modular machine design and technologies of dynamic action for finishing-grinding treatment by an oscillating abrasive medium. *Journal of Machining and Forming Technologies*, Vol. 7 (1-2), p. 1 – 10, (2015).
31. Kharlamov Yu.A. Fizyka, khimiya ta mekhanika poverkhni tverdoho tila: navchal'nyy posibnyk / Kharlamov Yu.A., Budah'yants N.A. Luhans'k: VUHU, 2000. 624 s.
32. Opal'chuk O.S. Teoretychni ta tekhnolohichni zasady pidvyshchennya kontaktnoyi vtomlyval'noyi mitsnosti staley / O.S. Opal'chuk // *Vibratsiyni u tekhnitsi ta tekhnolohiyakh*. - 2004. - №3. - S. 31 - 34.
33. Kopylov Yu.R. Vibroudarne zmitsnennya / Yu.R. Kopyliv. Voronezh: VIMVS, 1999. 384 s.

Nikolaenko A., Shumakova T. Research of the process of forming surface of parts during vibrating processing
The research of vibrating processing in machine-tools with U-shaped container and its influence on the forming of parts surface layer were held and its results are presented in the article. It was considered the parameters of surface roughness and their effect on the quality of the surface layer of

machine parts. The most important performance properties of machine parts (wear resistance, contact stiffness, joint density and landing strength) largely depend on their contact interaction (contact characteristics, convergence, actual contact area and dynamic characteristics of surface joints). To solve the problem of ensuring the required performance properties, it is necessary to know the dependencies that link the quality characteristics of the surfaces being treated with the processing conditions, and the dependencies should reflect the impact of technological heredity. The aim of the experimental researchers was to establish the relationship between the modes and time of vibrating processing and the process of forming the surface layer of machine parts. During the experimental researches we compared the parameters of surface roughness of samples of steels 20, 40X and U8 after different processing methods, namely: after roughing, finishing and after vibrating processing. An improvement of the qualitative parameters of surface roughness after the application of vibrating processing was shown as the result of experimental researches. The reference surface area and the bearing capacity of the profile of samples were increased. Such changes have a positive effect on the contact interaction, increase the adsorption capacity, which is important in the preparation of surfaces for protective coatings and the overall improvement of the performance of machine parts. As a result of the application of vibrating processing there were a significant increase in the

average radius of curvature by an average of 18.3 times, an increase in the average step of irregularities by an average of 2.24 times, an increase in the reference length of the profile by an average of 2.6 times and increase wear resistance to 15 ... 20 %.

Keywords: vibrating processing; performance properties; surface roughness; reference length of the profile; radius of rounding of irregularities.

Ніколаєнко Анна Павлівна – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк)
apnikolaienko@gmail.com

Шумакова Тетяна Олександрівна – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк)
shumakovatania@gmail.com

Стаття подана 12.01.2022.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-272-2-62-66>

УДК 697

КРИТЕРІАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ДИФУЗІЙНИХ ПРОЦЕСІВ В КАНАЛАХ ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМ

Соколов В.І.

CRITERIA ANALYSIS OF DIFFUSION PROCESSES IN CHANNELS OF VENTILATION SYSTEMS

Sokolov V.I.

Розглянуто процес турбулентної дифузії газових домішок в каналах вентиляційних систем. Стаціонарна дифузія описана рівнянням турбулентної дифузії домішки в однорідному нестисливому середовищі. Вважається, що актуальна концентрація в кожній точці простору, зайнятого турбулентним потоком, зазнає безладних змін у часі (пульсує, флукує). При вирішенні практичних завдань про рух частинок домішки від актуальної характеристики застосовано перехід до середнього значення концентрації. У випадку встановленого турбулентного руху і стаціонарних зовнішніх умов використане введення Рейнольдсом часового осереднення. Осередненні значення добутків пульсаційних складових проекцій швидкості та концентрації відповідно гіпотезі Фіка-Буссінеска прийняті пропорційними градієнту осередненої концентрації. Обґрунтовано допущення, що для робочих режимів промислових вентиляційних систем коефіцієнт молекулярної дифузії значно менше коефіцієнта турбулентної дифузії. Для коефіцієнта турбулентної дифузії використана відомо-емпірична залежність для круглих труб. Коефіцієнт гідравлічного опору тертя при турбулентному режимі течії визначений по універсальній формулі Альтшуля. Для дослідження дифузійних процесів в газових потоках вентиляційних систем рівняння турбулентної дифузії приведено до безрозмірного виду. У розгляд введені безрозмірні критерії: число Рейнольдса, число Шмідта (або дифузійне число Прандтля), дифузійне число Пекле. Проведений аналіз критеріальних співвідношень для дифузійних процесів в циліндричних каналах вентиляційних систем. Аналіз залежності дифузійного числа Пекле від числа Рейнольдса показав, що при великих значеннях відносної шорсткості величина дифузійного числа Пекле не залежить від числа Рейнольдса. Показана наявність в дифузійних процесах автотурбулентної зони, коли довжина шляху вирівнювання концентрації домішки не буде залежати від параметрів газового потоку. Встановлено, що зміна дифузійного Числа Пекле для діапазону значень чисел Рейнольдса понад $1,3 \cdot 10^5$ складає не більш 5% при значеннях відносної шорсткості не менш 0,001.

Ключові слова: вентиляційна система, диффузійний процес, число Рейнольдса, диффузійне число Пекле, число Шмідта.

Постановка проблеми. Проектування та розробка вентиляційних систем, охолоджуючих пристроїв, теплосилових установок пов'язано з розрахунком процесів дифузії аерозолів в турбулентних газових потоках [1-5]. Крім того, аналіз процесів дифузії домішок в газових потоках є визначальним при вимірюванні викидів через вентиляційні системи промислових підприємств, шахт, енергоблоків атомних станцій, при розробці систем теплогазопостачання та ін. Достовірний контроль параметрів промислових викидів дозволяє раціонально вирішувати питання з модернізації вентиляційних систем та корекції технологічних процесів, запобігати аварійним ситуаціям, розробляти заходи з екологічної безпеки [6-10].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дифузія домішки в турбулентному газовому потоці є складним нестационарним процесом [11-15], що описується диференціальними рівняннями в частинних похідних. Домішкою називають «сторонню речовину», що міститься у порівняно невеликій кількості в об'ємах газового середовища. «Стороння речовина» міститься у вигляді рідких, твердих або газоподібних об'єктів (включень) [16-20]. Якщо наявність домішки не впливає на фізичні властивості газового середовища та на формування поля швидкості в турбулентному потоці, то таку домішку вважають пасивною. У випадку пасивної домішки характеристики турбулентного потоку, що виміряні в потоці «чистого» середовища (який не містить домішку, що розглядається), можна використовувати для розрахунку руху часток цієї домішки у просторі, який зайнятий таким же потоком, що несе домішку [21-25].

Зважаючи на складність дослідження дифузійних процесів в інженерній практиці знайшли застосування як аналітичні, так й емпіричні методи дослідження на основі теорії подібності [26-29]. Дати

точний аналітичний розрахунок дифузії в потоці, особливо турбулентному, часто виявляється, важко чи навіть неможливо. Тому, в цих випадках переходять до теорії подібності, яка використовує безрозмірні числа, що називаються критеріями подібності.

Мета статті. Методом роботи є дослідження характеристик дифузійних процесів в турбулентних газових потоках циліндричних каналів вентиляційних систем на основі аналізу критеріальних співвідношень.

Матеріали та результати дослідження.

Актуальною (миттєвою) концентрацією домішки є величина [21, 26, 27]

$$C(x, y, z, t) = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V}, \quad (1)$$

де ΔV – деякий малий об'єм частини простору, що виділений навколо точки з координатами x, y, z ; Δm – маса домішки, яка знаходиться в цьому об'ємі на момент часу t .

Актуальна концентрація в кожній точці простору, зайнятого турбулентним потоком, зазнає безладних змін у часі (пульсує, флукує). При вирішенні практичних завдань про рух частинок домішки від актуальної характеристики переходять до середнього значення концентрації. У випадку встановленого турбулентного руху і стаціонарних зовнішніх умов використовується введене Рейнольдсом часове осереднення

$$\langle C(x, y, z) \rangle = \frac{1}{t_0} \int_t^{t+t_0} C(x, y, z) dt, \quad (2)$$

де t_0 – обраний відповідним чином інтервал часу.

Стаціонарна дифузія газових домішок в каналах вентиляційних систем може бути описана рівнянням турбулентної дифузії домішки в однорідному нестисливому середовищі [26], яке в декартовій системі координат має вигляд (індекс «<...>» осередненого значення у подальшому опускаємо)

$$u_x \frac{\partial C}{\partial x} + u_y \frac{\partial C}{\partial y} + u_z \frac{\partial C}{\partial z} = f(x, y, z) + D_t \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right); \quad (3)$$

де $f(x, y, z)$ – об'ємна щільність потужності джерел молекул домішки; D_t – коефіцієнт турбулентної дифузії.

Коефіцієнт турбулентної дифузії встановлюють або на основі експериментальних даних, або на додаткових гіпотезах. Відзначимо відому формулу Хінце для круглих труб, що наведена в роботі [21]

$$D_t = 0,02 u_0 d \sqrt{\lambda}. \quad (4)$$

Тут u_0 – швидкість потоку в трубі, d – діаметр труби, λ – коефіцієнт гідравлічного опору тертя. Даний вираз перетворимо до вигляду

$$D_t = 0,02 u_0 d \sqrt{\lambda} = 0,02 \frac{u_0 d}{v} \quad (5)$$

або

$$D_t = 0,02 \text{Re} \nu \sqrt{\lambda}. \quad (6)$$

де Re – число Рейнольдса.

Коефіцієнт гідравлічного опору тертя λ при турбулентному режимі течії достатньо точно визначається по універсальній формулі Альтшуля [17, 27]

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta}{d} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25}, \quad (7)$$

де Δ – абсолютна шорсткість внутрішньої поверхні каналу.

Вводимо безрозмірні швидкості, координати і концентрацію

$$\bar{u}_x = u_x / u_0; \quad \bar{u}_y = u_y / u_0; \quad \bar{u}_z = u_z / u_0; \\ \bar{x} = x / d_h; \quad \bar{y} = y / d_h; \quad \bar{z} = z / d_h; \quad \bar{C} = C / C_0; \quad (8)$$

де C_0 – масштаб концентрації домішки в каналі; d_h – гідравлічний діаметр, величина якого для каналів некруглої форми дорівнює $d_h = 4S/P$ (S – площа поперечного перерізу, P – його периметр).

Рівняння дифузії для безрозмірних змінних приводимо до вигляду

$$\bar{u}_x \frac{\partial \bar{C}}{\partial \bar{x}} + \bar{u}_y \frac{\partial \bar{C}}{\partial \bar{y}} + \bar{u}_z \frac{\partial \bar{C}}{\partial \bar{z}} = \bar{f}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) + \\ + \frac{1}{\text{ReSc}} \left(\frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial \bar{y}^2} + \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial \bar{z}^2} \right). \quad (9)$$

Тут число Шмідта (або дифузійне число Прандтля)

$$\text{Sc} = \text{Pr}_d = \frac{\nu}{D_t}, \quad (10)$$

а вираз

$$\bar{f}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) = \frac{d_h}{u_0 C_0} f(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) \quad (11)$$

є об'ємною щільністю потужності джерел молекул домішки.

Як витікає з рівняння (9) довжина шляху вирівнювання концентрації домішки в каналі визначається параметрами газового потоку, які можна задати двома безрозмірними критеріями: числом Рейнольдса

са Re і Шмідта Sc ; а також характером джерела домішки та формою каналу.

У випадку стаціонарного дифузійного процесу та джерела молекул домішки геометричні параметри процесу будуть залежати від добутку числа Рейнольдса на число Шмідта, яке прийнято називати дифузійним числом Пекле

$$Pe_d = ReSc. \quad (12)$$

Зв'яжемо число Шмідта с числом Рейнольдса, для чого в (10) підставимо (6)

$$Sc = \frac{\nu}{D_t} = \frac{50}{Re\sqrt{\lambda}}, \quad (13)$$

а потім сюди вираз (7)

$$Sc = \frac{50}{Re\sqrt{0,11\left(\frac{\Delta}{d_h} + \frac{68}{Re}\right)^{0,25}}} = \frac{151}{Re(\bar{\Delta} + 68/Re)^{0,125}}, \quad (14)$$

де $\bar{\Delta} = \Delta/d_h$ – відносна шорсткість внутрішньої поверхні каналу.

Підстановка (14) в (12) дає

$$Pe_d = 151(\bar{\Delta} + 68/Re)^{-0,125}. \quad (15)$$

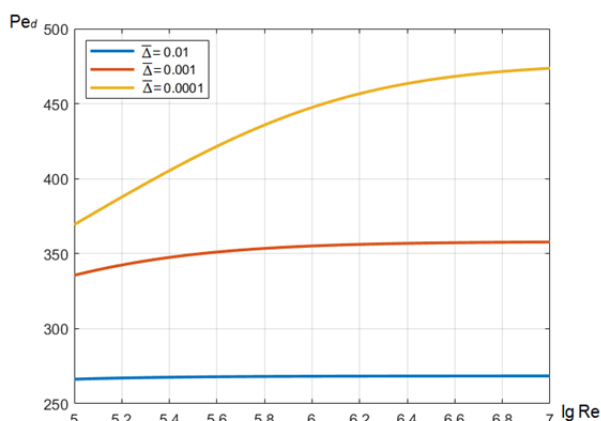


Рис. Залежність дифузійного числа Пекле від числа Рейнольдса

Залежність дифузійного Числа Пекле від числа Рейнольдса представлена на рисунку. Діапазон чисел Рейнольдса $10^5 \dots 10^7$, що розглядається, є робочим для промислових вентиляційних систем. Наведений результат показує, що при великих значеннях відносної шорсткості величина дифузійного числа

Пекле не залежить від числа Рейнольдса. Це означає наявність в дифузійних процесах автотельної зони, коли довжина шляху вирівнювання концентрації не буде залежати від параметрів газового потоку. Аналізуючи встановлені залежності можна стверджувати, що зміна дифузійного Числа Пекле для діапазону значень чисел Рейнольдса $Re > 1,3 \cdot 10^5$ складає не більш 5% при значеннях відносної шорсткості $\bar{\Delta}$ понад 0,001.

Висновки. Отже, розглянуто процес турбулентної дифузії у каналах вентиляційних систем. Стаціонарна дифузія газових домішок у каналах вентиляційних систем описана рівнянням турбулентної дифузії домішки в однорідному нестисливому середовищі. Осереднені значення добутків пульсаційних складових проекцій швидкості та концентрації згідно з гіпотезою Фіка-Буссінеска прийняті пропорційними градієнту середньої концентрації. Обґрунтовано припущення, що для робочих режимів роботи промислових вентиляційних систем коефіцієнт молекулярної дифузії значно менший за коефіцієнт турбулентної дифузії.

Для коефіцієнта турбулентної дифузії використано відому емпіричну залежність для круглих труб. Коефіцієнт гідравлічного опору тертя при турбулентному режимі течії визначено за універсальною формулою Альтшуля. Для дослідження дифузійних процесів у газових потоках вентиляційних систем рівняння турбулентної дифузії приведено до безрозмірного виду. У розгляд введено безрозмірні критерії: Число Рейнольдса Re , число Шмідта Sc (або дифузійне число Прандтля Pr_d), дифузійне число Пекле Pe_d .

Проведено аналіз критеріальних співвідношень для дифузійних процесів у циліндричних каналах вентиляційних систем. Залежність дифузійного числа Пекле Pe_d від Рейнольдса Re показала, що при великих значеннях відносної шорсткості $\bar{\Delta}$ величина дифузійного числа Пекле не залежить від числа Рейнольдса. Зміна дифузійного числа Пекле Pe_d для діапазону значень чисел Рейнольдса $Re > 1,3 \cdot 10^5$ становить не більше 5% при значеннях відносної шорсткості $\bar{\Delta} > 0,001$. Це свідчить про наявність у дифузійних процесах автотельної зони, коли довжина шляху вирівнювання концентрації домішки не буде залежати від параметрів газового потоку.

Література

1. Елинский И.И. Вентиляция и отопление гальванических цехов машиностроительных предприятий. М.: Машиностроение, 1989. 152 с.
2. Krol, O., Sokolov, V., Tsankov, P.: Modeling of vertical spindle head for machining center. Journal of Physics: Conference Series 1553 012012 (2020).
3. Krol, O., Sokolov, V.: Modeling of Spindle Node Dynamics Using the Spectral Analysis Method. In: Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 1, pp. 35-44. Springer, Cham (2020).
4. Krol, O., Sokolov, V.: Research of modified gear drive for multioperational machine with increased load capacity. Diagnostyka 21(3), 87-93 (2020).

5. Krol, O., Sokolov, V.: Research of toothed belt transmission with arched teeth. *Diagnostyka* 21(4), 15-22 (2020).
6. Свистунов В.М., Пушняков Н.К. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха объектов агропромышленного комплекса и жилищно-коммунального хозяйства. СПб.: Политехника, 2007. 423 с.
7. Krol, O., Porkuian, O., Sokolov, V., Tsankov, P.: Vibration stability of spindle nodes in the zone of tool equipment optimal parameters. *Comptes rendus de l'Academie bulgare des Sciences* 72(11), 1546-1556 (2019).
8. Sokolov V., Azarenko N., Sokolova Ya. Simulation of the power unit of the automatic electrohydraulic drive with volume regulation. TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. 2012. Vol. 12. No 4. P. 268 - 273.
9. Sokolov, V., Porkuian, O., Krol, O., Baturin, Y.: Design Calculation of Electrohydraulic Servo Drive for Technological Equipment. In: *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, vol. 1, pp. 75-84. Springer, Cham (2020).
10. Sokolov, V., Porkuian, O., Krol, O., Stepanova, O.: Design Calculation of Automatic Rotary Motion Electrohydraulic Drive for Technological Equipment. In: *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV. DSMIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, vol. 1, pp. 133-142. Springer, Cham (2021).
11. Ананьев В.А., Балуева Л.Н., Гальперин А.Д. и др. Системы вентиляции и кондиционирования. Теория и практика. М.: Евроклимат, 2001. 416 с.
12. Коваленко А.А., Соколов В.И., Дымнич А.Х., Уваров П.Е. Основы технической механики жидкостей и газов: Учебное пособие для вузов. Луганск: ВУГУ, 1998. 272 с.
13. Sokolov, V., Krol, O., Stepanova, O., Tsankov, P.: Dynamic characteristics of rotary motion electrohydraulic drive with volume regulation. *Comptes rendus de l'Academie bulgare des Sciences* 73(5), 691-702 (2020). DOI: <https://doi.org/10.7546/CRABS.2020.05.12>.
14. Харламов Ю.А., Соколов В.И., Кроль О.С. Трибологическая надежность металлорежущих станков. Северодонецк: ВНУ им. В. Даля, 2017. 320 с.
15. Sokolov, V.: Dynamics of Positioning Process for Hydraulic Drive Output Link by Distributor with Closed Center. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021). Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham (2022).
16. Беккер А. Системы вентиляции. М.: Техносфера, Евроклимат, 2005. 232 с.
17. Соколов В.И., Кроль О.С., Єпіфанова О.В. Гідравліка. Северодонецк: СНУ ім. В. Даля, 2017. 160 с.
18. Sokolov, V.: Hydrodynamics of flow in flat slot with boundary change of viscosity. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). Lecture Notes in Mechanical Engineering*, vol. 2, pp. 1172-1181. Springer, Cham (2021).
19. Sokolov, V.: Transfer functions for shearing stress in non-stationary fluid friction. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). ICIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, vol. 1, pp. 707-715. Springer, Cham (2020).
20. Андрийчук Н.Д., Соколов В.И., Коваленко А.А., Дядичев К.М. Пути совершенствования систем теплоснабжения. Луганск: ВНУ им. В. Даля, 2003. 244 с.
21. Соколов В.И., Кроль О.С., Єпіфанова О.В. Дифузійні процеси в системах вентиляції. Северодонецк: СНУ ім. В. Даля. 2018. 148 с.
22. Sokolov, V.: Criteria Analysis of Diffusion Processes in Channels of Industrial Ventilation Systems. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021). Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham (2022).
23. Андрийчук Н.Д., Ивашенко Е.А., Коваленко А.А., Соколов В.И. Термодинамика для инженеров-строителей. Луганск: ВНУ им. В. Даля, 2005. 304 с.
24. Sokolov, V., Krol, O.: Time Characteristics of Initial Stages for Aerosols Diffusion in Channels of Ventilation Systems. 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), pp. 1-6. IEEE (2020).
25. Sokolov, V.: Increase measurement accuracy of average velocity for turbulent flows in channels of ventilation systems. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, vol. 2, pp. 1182-1190, Cham (2021).
26. Соколов В.И., Коваленко А.А., Калужный Г.С. и др. Инженерные задачи диффузии примеси в потоке. Луганск: ВНУ, 2000. 168 с.
27. Соколов В.И. Аэродинамика газовых потоков в каналах сложных вентиляционных систем. Луганск: ВУГУ, 1999. 200 с.
28. Sokolov, V.: Diffusion of Circular Source in the Channels of Ventilation Systems. In: *Advances in Engineering Research and Application. ICERA 2018. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 63, pp. 278-283. Springer, Cham (2019).
29. Sokolov, V., Krol, O.: Measurement of Impurity Concentration in Turbulent Flows of Ventilation Systems Channels. *Journal of Physics: Conference Series* 2096 012102 (2021).

References

1. Elinskiy I. I. *Ventilyatsiya i otoplenie galvanicheskikh tsekhov mashinostroitelnykh predpriyatiy*. M.: Mashinostroyeniye, 1989. 152 s.
2. Krol, O., Sokolov, V., Tsankov, P.: Modeling of vertical spindle head for machining center. *Journal of Physics: Conference Series* 1553 012012 (2020).
3. Krol, O., Sokolov, V.: Modeling of Spindle Node Dynamics Using the Spectral Analysis Method. In: *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, vol. 1, pp. 35-44. Springer, Cham (2020).
4. Krol, O., Sokolov, V.: Research of modified gear drive for multioperational machine with increased load capacity. *Diagnostyka* 21(3), 87-93 (2020).
5. Krol, O., Sokolov, V.: Research of toothed belt transmission with arched teeth. *Diagnostyka* 21(4), 15-22 (2020).
6. Svistunov V.M., Pushnyakov N.K. *Otoplenie, ventilyatsiya i konditsionirovanie vozduha ob'ektov agropromyshlennogo kompleksa i zhilishchno-kommunalnogo hozyaystva*. SPb.: Politehnika, 2007. 423 s.
7. Krol, O., Porkuian, O., Sokolov, V., Tsankov, P.: Vibration stability of spindle nodes in the zone of tool equipment optimal parameters. *Comptes rendus de l'Academie bulgare des Sciences* 72(11), 1546-1556 (2019).
8. Sokolov V., Azarenko N., Sokolova Ya. Simulation of the power unit of the automatic electrohydraulic drive with volume regulation. TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. 2012. Vol. 12. No 4. P. 268 - 273.
9. Sokolov, V., Porkuian, O., Krol, O., Baturin, Y.: Design Calculation of Electrohydraulic Servo Drive for Techno-

- logical Equipment. In: Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 1, pp. 75-84. Springer, Cham (2020).
10. Sokolov, V., Porkuian, O., Krol, O., Stepanova, O.: Design Calculation of Automatic Rotary Motion Electrohydraulic Drive for Technological Equipment. In: Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV. DSMIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 1, pp. 133-142. Springer, Cham (2021).
 11. Ananov V.A., Balueva L.N., Galperin A.D. i dr. Sistemy ventilyatsii i konditsionirovaniya. Teoriya i praktika. M.: Evroklimat, 2001. 416 s.
 12. Kovalenko A.A. Osnovy tekhnicheskoy mekhaniki zhidkostej i gazov: uchebnoe posobie dlja vuzov/ A.A. Kovalenko, V.I. Sokolov, A.H. Dymnich, P.E. Uvarov. Lugansk: VUGU, 1998. 272 s.
 13. Sokolov, V., Krol, O., Stepanova, O., Tsankov, P.: Dynamic characteristics of rotary motion electrohydraulic drive with volume regulation. Comptes rendus de l'Academie bulgare des Sciences 73(5), 691-702 (2020). DOI: <https://doi.org/10.7546/CRABS.2020.05.12>.
 14. Kharlamov Y., Sokolov V., Krol O. Tribologicheskaya nadezhnost metallovezhushnih stankov. Severodonetsk: V. Dahl EUNU, 2017. 320 s.
 15. Sokolov, V.: Dynamics of Positioning Process for Hydraulic Drive Output Link by Distributor with Closed Center. In: Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021). Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham (2022).
 16. Bekker A. Sistemy ventilyatsii. M.: Tehnosfera, Evroklimat, 2005. 232 s.
 17. Sokolov V., Krol O., Yepifanova O. Hydraulics. Severodonetsk: V. Dahl EUNU, 2017. 160 s.
 18. Sokolov, V.: Hydrodynamics of flow in flat slot with boundary change of viscosity. In: Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 2, pp. 1172-1181. Springer, Cham (2021).
 19. Sokolov, V.: Transfer functions for shearing stress in non-stationary fluid friction. In: Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). ICIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 1, pp. 707-715. Springer, Cham (2020).
 20. Andrijchuk N.D., Sokolov V.I., Kovalenko A.A., Dyadichev K.M. Puti sovershenstvovaniya sistem teplosnabzheniya. Lugansk: VNU im. V. Dalia, 2003. 244 s.
 21. Sokolov V., Krol O., Yepifanova O. Diffusion processes in ventilation systems. Severodonetsk: V. Dahl EUNU, Severodonetsk, 2018. 148 c.
 22. Sokolov, V.: Criteria Analysis of Diffusion Processes in Channels of Industrial Ventilation Systems. In: Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021). Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham (2022).
 23. Andrijchuk N.D., Ivashenko E.A., Kovalenko A.A., Sokolov V.I. Termodinamika dlya inzhenerov-stroitelej. Lugansk: VNU im. V. Dalia, 2005. 304 s.
 24. Sokolov, V., Krol, O.: Time Characteristics of Initial Stages for Aerosols Diffusion in Channels of Ventilation Systems. 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), pp. 1-6. IEEE (2020).
 25. Sokolov, V.: Increase measurement accuracy of average velocity for turbulent flows in channels of ventilation systems. In: Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 2, pp. 1182-1190. Springer, Cham (2021).
 26. Sokolov V.I., Kovalenko A.A., Kalyuzhnyj G.S. i dr. Inzhenernye zadachi diffuzii primesi v potoke. Lugansk: VNU, 2000. 168 s.
 27. Sokolov V.I. Aerodinamika gazovyh potokov v kanalah slozhnykh ventilyacionnykh sistem. Lugansk: VUGU, 1999. 200 s.
 28. Sokolov, V.: Diffusion of Circular Source in the Channels of Ventilation Systems. In: Advances in Engineering Research and Application. ICERA 2018. Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 63, pp. 278-283. Springer, Cham (2019).
 29. Sokolov, V., Krol, O.: Measurement of Impurity Concentration in Turbulent Flows of Ventilation Systems Channels. Journal of Physics: Conference Series 2096 012102 (2021).

Sokolov V.I. Criteria analysis of diffusion processes in channels of ventilation systems

The process of turbulent diffusion of gas impurities in the channels of the industrial ventilation systems is considered. The stationary diffusion is described by the equation for turbulent diffusion of impurity in homogeneous incompressible medium. It is believed that the actual concentration at each point of the space occupied by the turbulent flow, undergoes random changes in time (pulsating, fluctuating). When solving practical problems about the motion of impurity particles from the actual characteristic, the transition to the average concentration value is applied. In the case of established turbulent motion and stationary external conditions, the time averaging introduced by Reynolds is used. According to the Fick-Boussinesq hypothesis, the averaged values of the multiplications of pulsating velocity components and concentration are accepted proportional to the averaged concentration gradient. The assumption is substantiated that for the operating modes of the industrial ventilation systems, the molecular diffusion coefficient is much lower than the turbulent diffusion coefficient. For the turbulent diffusion coefficient, the well-known empirical dependence for round pipes is used. The hydraulic resistance coefficient to friction under turbulent flow conditions is determined by the universal Altshul formula. To study diffusion processes in the gas flows of the ventilation systems, the equation of turbulent diffusion is reduced to dimensionless form. The dimensionless criteria are introduced into consideration: the Reynolds number, the Schmidt number (or the diffusion Prandtl number), and the diffusion Peclet number. The analysis of the criterion relations for diffusion processes in the cylindrical channels of the ventilation systems is carried out. The dependence of the diffusion Peclet number from the Reynolds number showed that for big values of relative roughness, the Peclet diffusion number does not depend from the Reynolds number. The presence of the self-similar zone in diffusion processes is shown, when the path length for equalizing the impurity concentration will not depend from the gas flow parameters.

Keywords: ventilation systems, turbulent flow, Diffusion process, Reynolds number, diffusion Peclet number, Schmidt number.

Соколов Володимир Ілліч – д.т.н., проф., завідувач кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк), sokolov.snu.edu@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-272-2-67-73>

УДК 532.5

РОЗРАХУНОК ДОТИЧНОЇ НАПРУГИ ПРИ НЕСТАЦІОНАРНОМУ РІДИННОМУ ТЕРТІ

Соколов В.І., Батурін Є.О., Чернікова О.М.

CALCULATION OF SHEARING STRESS FOR NONSTATIONARY FLUID FRICTION

Sokolov V.I., Baturin Y.O., Chernikova E.M.

Важливим параметром у розрахунках гідромеханічних процесів є сила в'язкого рідинного тертя, яка характеризується дотичною напругою, що виникає в робочому середовищі, яке стикається з поверхнею рухомого елемента виконавчого, регулюючого, розподільного або допоміжного гідравлічного пристрою. За наявності зазору між поверхнями елементів дотичні напруги виникають при відносному русі цих поверхонь і руху середовища під впливом перепаду тиску. Традиційні підходи до побудови математичних моделей нестационарних гідромеханічних процесів здебільшого засновані на тому, що реальні потоки замінюються послідовністю змінних в часі потоків з квазістационарним розподілом гідродинамічних величин по живому перетину. Це дозволяє вводити до розрахунку коефіцієнти та характеристики, які отримані для стаціонарних потоків. Насправді структура нестационарної течії відрізняється від квазістационарної, причому не завжди відомо, як і за яких умов така відмінність може вплинути на зміну гідродинамічних характеристик. Тому розглянуто нестационарний плоский ламінарний рух нестисливої рідини у зазорі між рухомим та нерухомим елементами в декартовій системі координат. Рішення рівняння руху в частинних похідних виконано із застосуванням перетворення Лапласа. В операторній формі отримана залежність для дотичної напруги при нестационарному рідинному терті. Визначено передавальні функції для дотичної напруги по швидкості рухомого елемента та градієнту тиску. На основі аналізу амплітудно-частотних характеристик встановлені границі квазістационарного підходу для розрахунку сил нестационарного в'язкого тертя на рухомих елементах гідравлічних пристроїв. Отримано апроксимаційні передавальні функції для нестационарної дотичної напруги, що дозволяють встановити зв'язок між оригіналами у вигляді звичайних лінійних диференціальних рівнянь. Запропоновано залежність для дотичної напруги при нестационарному рідинному терті, яка враховує прискорення рухомої поверхні, що дозволяє підвищити точність розрахунку динамічних характеристик гідравлічних систем.

Ключові слова: рідинне тертя, дотична напруга, рівняння руху, перетворення Лапласа, передавальна функція.

Вступ. Найбільш важким та відповідальним етапом у розрахунках та розробці нових елементів та пристроїв, машин і механізмів, приводів та систем управління є побудова математичних моделей нестационарних робочих процесів, що протікають в них [1-5]. Дуже важливо не допустити надмірного невинновданого ускладнення математичних моделей, оскільки вони можуть виявитися непридатними у практичному використанні. Разом з тим, нехтування явищами, які істотно впливають на робочі процеси, може зробити модель занадто грубою, що не забезпечує необхідної точності, а також не відображає основних особливостей процесів, що протікають.

Постановка проблеми. Нестационарні гідромеханічні процеси відносяться до складних фізичних явищ, при яких виникають неусталені течії рідини зі зміною швидкостей і тисків не тільки в часі, але і в просторі, що зайнятий потоком [6-10]. Безпосередній опис таких процесів призводить до систем нелінійних диференціальних рівнянь у частинних похідних, причому крайові умови, які необхідні для вирішення цих рівнянь, часто є диференціальними рівняннями, що описують динамічні процеси в тих пристроях, з якими взаємодіють потоки рідини. Використання таких складних моделей вимагає виконання трудомістких розрахунків, які можуть і не дати доступних для огляду результатів.

Важливим параметром у розрахунках гідромеханічних процесів є сила в'язкого рідинного тертя, яка характеризується дотичною напругою, що виникає в робочому середовищі, яке стикається з поверхнею рухомого елемента виконавчого, регулюючого, розподільного або допоміжного гідравлічного пристрою [11-15]. За наявності зазору між поверхнями елементів дотичні напруги виникають при відносному русі цих поверхонь і руху середовища під впливом перепаду тиску.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Традиційні підходи [16-20] до побудови математичних моделей нестационарних гідромеханічних процесів здебільшого засновані на тому, що реальні потоки замінюються послідовністю змінних в часі потоків з квазістационарним розподілом гідродинамічних величин по живому перетину. Це дозволяє вводити до розрахунку коефіцієнти та характеристики, отримані для стационарних потоків. Насправді структура нестационарної течії відрізняється від квазістационарної [21-25], причому не завжди відомо, як і за яких умов така відмінність може вплинути на зміну гідродинамічних характеристик.

У реальних пристроях величина зазору мала так, що течія між паралельними стінками розглядається як ламінарна та плоска (рис. 1), а розподіл швидкості (рис. 2) має вигляд [1, 11, 21, 22]

$$\frac{u}{u_0} = \frac{\delta^2}{2\rho\nu} \frac{dp}{dx} \frac{y}{\delta} \left(1 - \frac{y}{\delta}\right) + \frac{y}{\delta}, \quad (1)$$

де x, y – координати; u – швидкість руху рідини у зазорі; u_0 – швидкість руху рухомого елемента (або відносна швидкість руху поверхонь); δ – розмір зазору; dp/dx – градієнт тиску; ρ, ν – щільність та кінематична в'язкість середовища.

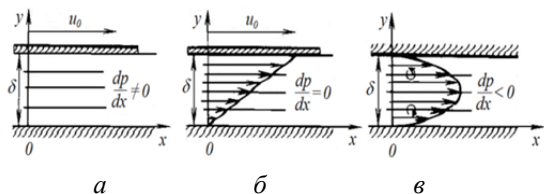


Рис. 1. Ламінарна течія між паралельними площинами: а – схема течії; б – розподіл швидкостей за відсутності градієнта тиску (течія Куєтта); в – розподіл швидкостей при нерухомих граничних площинах (течія у плоскому каналі)

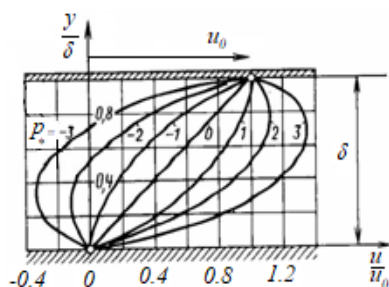


Рис. 2. Безрозмірні профілі швидкості для загального випадку течії рідини між паралельними стінками

$$\left(p_* = -\frac{\delta^2}{2\rho\nu u_0} \frac{dp}{dx}\right)$$

Розрахунок дотичної напруги τ виконується на підставі розподілу швидкості (1) згідно із законом в'язкого тертя Ньютона [11, 22]

$$\tau = \rho\nu \frac{du}{dy}. \quad (2)$$

Метою статті є отримання залежностей для розрахунку дотичної напруги при нестационарному рідинному терті з урахуванням інерційності зміни структури потоку в зазорі, а також оцінка границь квазістационарного підходу для розрахунку сил нестационарного в'язкого тертя на рухомих елементах гідравлічних пристроїв.

Матеріали та результати дослідження. Нехай швидкість руху рухомого елемента (або відносна швидкість руху поверхонь) є нестационарною

$$u_0 = V(t). \quad (3)$$

Тоді, при квазістационарному підході, дотична напруга на рухомій поверхні (квазістационарна дотична напруга) з урахуванням (1)

$$\tau_{qs}^0 = \rho\nu \frac{du}{dy} = -\frac{\delta}{2} \frac{dp}{dx} + \frac{\rho\nu}{\delta} V(t), \quad (4)$$

яке без урахування градієнта тиску визначається добре відомою залежністю [1, 10, 22]

$$\tau_{qs}^0 = \frac{\rho\nu}{\delta} V(t). \quad (5)$$

Перетворюємо (4) по Лапласу [10, 16] і встановлюємо передавальні функції для квазістационарної дотичної напруги за швидкістю рухомого елемента та градієнтом тиску

$$W_{\tau V, qs}(s) = \frac{\tau_{qs}^0(s)}{V(s)} = k_{\tau V}, \quad (6)$$

$$W_{\tau p, qs}(s) = \frac{\tau_{qs}^0(s)}{\frac{dp}{dx}(s)} = k_{\tau p}, \quad (7)$$

де s – змінна Лапласа; коефіцієнти передач $k_{\tau V} = \rho\nu/\delta$, $k_{\tau p} = \delta/2$.

З метою отримання передавальних функцій для дотичного напруги, що враховують вплив інерційності структури потоку, розглянемо нестационарний ламінарний рух нестисливої рідини в зазорі між нерухомих і рухомих елементами в декартовій системі координат (рис.1). Допускаючи течії плоским, рівняння руху рідини представимо у відомому вигляді [1,11]

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}. \quad (8)$$

Для швидкості рідини u , що є функцією часу t та координати y , визначимо граничні умови:

$$\begin{cases} u = 0, & y = 0; \\ u = V(t), & y = \delta. \end{cases} \quad (9)$$

Для спрощення математичних викладок зробимо заміну змінних

$$z = y - \delta, \quad (10)$$

а також врахуємо, що для розглянутої аналізованої течії

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{dp}{dx}. \quad (11)$$

З урахуванням (10, 11) замість (8, 9) маємо:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}, \quad (12)$$

$$\begin{cases} u = 0, & z = -\delta; \\ u = V(t), & z = 0. \end{cases} \quad (13)$$

Застосовуючи одномірне перетворення Лапласа при нульових початкових умовах, отримаємо замість рівняння (12) у частинних похідних рівняння у звичайних похідних

$$\frac{d^2 u(s)}{dz^2} - \frac{s}{\nu} u(s) = \frac{p(s)}{\rho s}, \quad (14)$$

де $u(s)$, $p(s)$ – зображення по Лапласу швидкості u та градієнта тиску dp/dx .

Рішення рівняння (14) має вигляд

$$u(s) = A_1 \exp\left(z\sqrt{\frac{s}{\nu}}\right) + A_2 \exp\left(-z\sqrt{\frac{s}{\nu}}\right) - \frac{p(s)}{\rho s}, \quad (15)$$

де A_1 , A_2 – постійні інтегрування.

Відносно напруження на поверхні рухомого елемента знаходимо згідно із законом в'язкого тертя Ньютона

$$\tau^0(s) = \rho \nu \left(\frac{\partial u(s)}{\partial y} \right) \Big|_{y=\delta} = \rho \nu \left(\frac{\partial u(s)}{\partial z} \right) \Big|_{z=0}. \quad (16)$$

Підставляючи (15) в (16), маємо

$$\tau^0(s) = \rho \nu \sqrt{\frac{s}{\nu}} (A_1 - A_2). \quad (17)$$

Значення $A_1 - A_2$ визначаємо, використовуючи граничні умови (13) та отримане рішення (15):

$$0 = A_1 \exp\left(-\sqrt{\frac{\delta^2 s}{\nu}}\right) + A_2 \exp\left(\sqrt{\frac{\delta^2 s}{\nu}}\right) - \frac{p(s)}{\rho s}; \quad (18)$$

$$V(s) = A_1 + A_2 - \frac{p(s)}{\rho s}. \quad (19)$$

Помножимо (19) на $\exp\left(-\sqrt{\frac{\delta^2 s}{\nu}}\right)$ і віднімемо

(18), тоді маємо

$$\begin{aligned} V(s) \exp\left(-\sqrt{\frac{\delta^2 s}{\nu}}\right) = & \\ & -2A_2 sh\left(\sqrt{\frac{\delta^2 s}{\nu}}\right) + \frac{p(s)}{\rho s} \left(1 - \exp\left(-\sqrt{\frac{\delta^2 s}{\nu}}\right)\right). \end{aligned} \quad (20)$$

Віднімання (18) з (19), помноженого на $\exp\left(\sqrt{\frac{\delta^2 s}{\nu}}\right)$, дає

$$\begin{aligned} V(s) \exp\left(\sqrt{\frac{\delta^2 s}{\nu}}\right) = & \\ & -2A_1 sh\left(\sqrt{\frac{\delta^2 s}{\nu}}\right) + \frac{p(s)}{\rho s} \left(1 - \exp\left(\sqrt{\frac{\delta^2 s}{\nu}}\right)\right). \end{aligned} \quad (21)$$

Підсумовуємо (20) та (21)

$$\begin{aligned} 2V(s) ch\left(\sqrt{\frac{\delta^2 s}{\nu}}\right) = & \\ = 2(A_1 - A_2) sh\left(\sqrt{\frac{\delta^2 s}{\nu}}\right) + \frac{2p(s)}{\rho s} \left(1 - ch\left(\sqrt{\frac{\delta^2 s}{\nu}}\right)\right), \end{aligned} \quad (22)$$

звідки отримуємо

$$A_1 - A_2 = \frac{p(s)}{\rho s} \frac{ch\left(\sqrt{\frac{\delta^2 s}{\nu}}\right) - 1}{sh\left(\sqrt{\frac{\delta^2 s}{\nu}}\right)} + V(s) cth\left(\sqrt{\frac{\delta^2 s}{\nu}}\right). \quad (23)$$

Підставляємо (23) у (17)

$$\begin{aligned} \tau^0(s) = & -p(s) \sqrt{\frac{\nu}{s}} \frac{ch\left(\sqrt{\frac{\delta^2 s}{\nu}}\right) - 1}{sh\left(\sqrt{\frac{\delta^2 s}{\nu}}\right)} + \\ & + \rho \nu \sqrt{\frac{s}{\nu}} V(s) cth\left(\sqrt{\frac{\delta^2 s}{\nu}}\right), \end{aligned} \quad (24)$$

після чого перетворюємо на вигляд

$$\tau^0(s) = -\frac{\delta}{2} p(s) \frac{2}{\sqrt{\frac{\delta^2 s}{\nu}}} \frac{ch\left(\sqrt{\frac{\delta^2 s}{\nu}}\right) - 1}{sh\left(\sqrt{\frac{\delta^2 s}{\nu}}\right)} + \dots \quad (25)$$

$$+ \frac{\rho \nu}{\delta} V(s) \left[\sqrt{\frac{\delta^2 s}{\nu}} cth\left(\sqrt{\frac{\delta^2 s}{\nu}}\right) \right].$$

Даний вираз є нестационарною дотичною напругою на поверхні рухомого елемента в операторній формі. Неважко переконалися, що при сталій течії (25) перетворюється на (4), оскільки:

$$\lim_{s \rightarrow 0} \left[\frac{2}{\sqrt{\frac{\delta^2 s}{\nu}}} \frac{ch\sqrt{\frac{\delta^2 s}{\nu}} - 1}{sh\sqrt{\frac{\delta^2 s}{\nu}}} \right] = 1, \quad (26)$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} \left[\sqrt{\frac{\delta^2 s}{\nu}} cth\sqrt{\frac{\delta^2 s}{\nu}} \right] = 1. \quad (27)$$

Відповідно до рівняння (25), отримуємо передавальну функцію для нестационарної дотичної напруги за швидкістю рухомого елемента

$$W_{\tau'}(s) = \frac{\tau^0(s)}{V(s)} = k_{\tau'} \sqrt{T s} cth\sqrt{T s}, \quad (28)$$

де $k_{\tau'}$ – коефіцієнт передачі, введений згідно з виразом (6); $T = \delta^2/\nu$ – постійна часу.

Розглянемо безрозмірну передатну функцію

$$\bar{W}_{\tau'}(\bar{s}) = \frac{W_{\tau'}(\bar{s})}{W_{\tau',kc}(\bar{s})} = \sqrt{\bar{s}} cth\sqrt{\bar{s}}, \quad (29)$$

де $\bar{s} = sT$ – безрозмірна змінна Лапласа. За функцією (29) визначимо амплітудно-частотну характеристику

$$\bar{A}_{\tau'}(\bar{\omega}) = \text{mod}[\bar{W}_{\tau'}(j\bar{\omega})], \quad (30)$$

де $j = \sqrt{-1}$; $\bar{\omega} = \omega T$ – безрозмірна частота.

Наведений на рис. 3 графік $\bar{A}_{\tau'}(\bar{\omega})$ показує, що при $\bar{\omega} < 0.81$ врахування нестационарності руху призводить до збільшення амплітуди коливань дотичної напруги трохи більше, ніж 5%. Тому, в цьому діапазоні для розрахунку частотних характеристик можна використовувати квазістационарну передавальну функцію (6). Таким чином, дане значення частоти можна розглядати як границю квазістационарного підходу для розрахунку сил в'язкого тертя при коливаннях рухомого елемента.

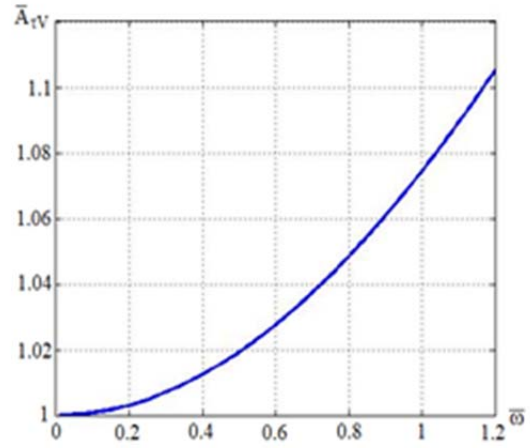


Рис. 3. Безрозмірна амплітудно-частотна характеристика дотичної напруги (при коливаннях швидкості рухомої поверхні)

Також, за виразом (25) встановимо передатну функцію для нестационарної дотичної напруги за градієнтом тиску

$$W_p(s) = \frac{\tau^0(s)}{p(s)} = k_p \frac{2}{\sqrt{T s}} \frac{ch\sqrt{T s} - 1}{sh\sqrt{T s}}, \quad (31)$$

де k_p – коефіцієнт передачі, введений згідно з виразом (7).

За безрозмірною передатною функцією

$$\bar{W}_p(\bar{s}) = \frac{W_p(\bar{s})}{W_{p,kc}(\bar{s})} = \frac{2}{\sqrt{\bar{s}}} \frac{ch\sqrt{\bar{s}} - 1}{sh\sqrt{\bar{s}}} \quad (32)$$

визначимо безрозмірну амплітудно-частотну характеристику

$$\bar{A}_{tp}(\bar{\omega}) = \text{mod}[\bar{W}_{tp}(j\bar{\omega})]. \quad (33)$$

Наведений на рис. 4 графік $\bar{A}_{tp}(\bar{\omega})$ показує, що при $\bar{\omega} < 3.34$ зменшення амплітуди коливань дотичної напруги не перевищує 5%. Тому, в цьому діапазоні для розрахунку частотних характеристик можна використовувати квазістационарну передавальну функцію (7). Таким чином, дане значення частоти можна розглядати як границю квазістационарного підходу для розрахунку сил в'язкого тертя при коливаннях тиску.

Отже, при врахуванні нестационарності структури потоку в зазорі для розрахунку дотичної напруги на рухомій поверхні маємо в загальному випадку наступне рівняння в операторній формі

$$\tau^0(s) = -W_p(s)p(s) + W_{\tau'}(s)V(s). \quad (34)$$

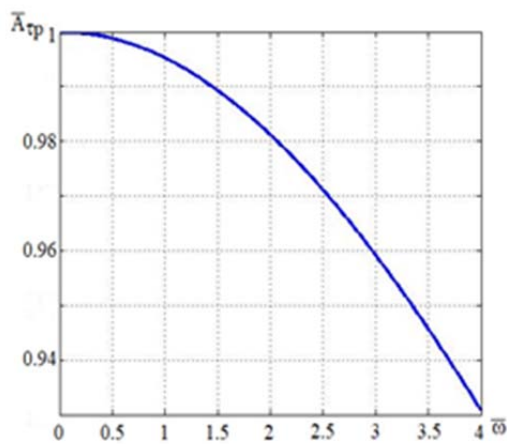


Рис. 4. Безрозмірна амплітудно-частотна характеристика дотичної напруги (при коливаннях градієнта тиску)

Слід зазначити, що наближення передавальних функцій (28, 31) дає їх апроксимація наступними функціями:

$$W_{\tau V}(s) \approx k_{\tau V} (1 + 0.387Ts); \quad (35)$$

$$W_p(s) \approx \frac{k_p}{0.098Ts + 1}; \quad (36)$$

за якими можна встановити зв'язок між оригіналами $\tau^0(t)$, $V(t)$, dp/dt у вигляді лінійних диференціальних рівнянь.

Відповідно до (35) маємо

$$\tau^0(s) = k_{\tau V} V(s) + 0.387k_{\tau V} Ts V(s). \quad (37)$$

Враховуючи, що згідно (6) $k_{\tau V} = \rho v / \delta$, а згідно (28) $T = \delta^2 / \nu$, отримуємо наступне рівняння для дотичної напруги

$$\tau^0(s) = \frac{\rho v}{\delta} V(s) + 0.387 \rho \delta s V(s). \quad (38)$$

Виконав зворотне перетворення Лапласа, маємо

$$\tau^0 = \frac{\rho v}{\delta} V(t) + 0.387 \rho \delta \frac{dV(t)}{dt}. \quad (39)$$

Порівняння (39) та (5) показує, що при нестационарному русі з'являється нестационарна добавка

$$\Delta \tau = 0.387 \rho \delta \frac{dV(t)}{dt}. \quad (40)$$

Залежність для дотичної напруги (39) при нестационарному рідинному терті враховує прискорення рухомої поверхні (40), що дозволяє підвищи-

ти точність розрахунку динамічних характеристик гідравлічних систем.

Висновки. Таким чином, розглянуто нестационарний плоский ламінарний рух нестисливої рідини в зазорі між рухомим і нерухомим елементами в декартовій системі координат. Рішення рівняння руху на приватних похідних виконано із застосуванням перетворення Лапласа. В операторній формі отримана залежність для дотичної напруги при нестационарному рідинному терті. Визначено передавальні функції для дотичної напруги за швидкістю рухомого елемента та градієнта тиску.

На основі аналізу амплітудно-частотних характеристик встановлено границі квазістационарного підходу для розрахунку сил нестационарного в'язкого тертя на рухомих елементах гідравлічних пристроїв. Оцінка границь квазістационарного підходу до розрахунку сил нестационарного в'язкого тертя виконана за амплітудно-частотними характеристиками при коливаннях рухомого елемента та градієнта тиску. В якості границь квазістационарності прийняті частоти, при яких відбувається зміна амплітуди більш ніж на 5%.

Отримано апроксимаційні передавальні функції для нестационарної дотичної напруги, що дозволяють встановити зв'язок між оригіналами у вигляді звичайних лінійних диференціальних рівнянь. Запропоновано залежність для дотичної напруги при нестационарному рідинному терті, яка враховує прискорення рухомої поверхні, що дозволяє підвищити точність розрахунку динамічних характеристик гідравлічних систем.

Література

1. Попов Д. Н. Механика гидро- и пневмоприводов: учеб. для вузов. Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. 320 с.
2. Петраков Ю.В. Автоматичне управління процесами обробки матеріалів різанням: навчальний посібник. Київ: УкрНДІАТ, 2003. 383 с.
3. Коваленко А. А., Соколов В.И., Уваров П.Е., Пазин В.В. Основы объемного гидравлического привода строительных и дорожных машин. Луганск: ДонГАСА, 1999. 137 с.
4. Свешников В.К. Станочные гидроприводы: справочник. Москва: Машиностроение, 2008. 640 с.
5. Rydberg K.-E. Hydraulic Servo Systems: Dynamic Properties and Control. Linköping University Electronic Press, Linköping, 2016.
6. Sokolov, V., Porkuian, O., Krol, O., Baturin, Y.: Design Calculation of Electrohydraulic Servo Drive for Technological Equipment. In: Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 1, pp. 75-84. Springer, Cham (2020).
7. Sokolov, V., Porkuian, O., Krol, O., Stepanova, O.: Design Calculation of Automatic Rotary Motion Electrohydraulic Drive for Technological Equipment. In: Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV. DSMIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 1, pp. 133-142. Springer, Cham (2021).

8. Федорец В.А., Педченко М.Н., Пичко А.Ф., Пересадко Ю.В., Лысенко В.С. Гидроприводы и гидропневмоавтоматика станков. Киев: Высш. школа, 1987. 375 с.
9. Навроцкий К.Л. Теория и проектирование гидро- и пневмоприводов. Москва: Машиностроение, 1991. 384 с.
10. Sokolov, V., Krol, O., Stepanova, O., Tsankov, P.: Dynamic characteristics of rotary motion electrohydraulic drive with volume regulation. *Comptes rendus de l'Academie bulgare des Sciences* 73(5), 691-702 (2020).
11. Коваленко А.А., Соколов В.И., Дымнич А.Х., Уваров П.Е. Основы технической механики жидкостей и газов: учебное пособие для вузов. Луганск: ВУГУ, 1998. 272 с.
12. Sokolov, V., Rasskazova, Y.: Automation of control processes of technological equipment with rotary hydraulic drive. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 2(2(80)), 44–50 (2016).
13. Sokolov, V., Krol, O., Romanchenko, O., Kharlamov, Y., Baturin, Y.: Mathematical model for dynamic characteristics of automatic electrohydraulic drive for technological equipment. *Journal of Physics: Conference Series* 1553 012013 (2020).
14. Sokolov V., Azarenko N., Sokolova Ya. Simulation of the power unit of the automatic electrohydraulic drive with volume regulation // *TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture*. Vol. 12. N 4. 2012. Lublin, Poland. pp. 268 - 273.
15. Sokolova, Y., Tavanuk, T., Greshnoy, D.: Linear modeling of the electrohydraulic watching drive. *TEKA Comm. Mot. Energ. Agric.* XIB, 167–176 (2011).
16. Попов Д.Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем. Москва: Машиностроение, 1987. 464 с.
17. Соколов В.І. Розробка та дослідження системи автоматичного керування технологічним обладнанням з гідроприводом обертального руху / В.І. Соколов, О.Г. Степанова, Я.І. Степчук, Д.Ю. Кавун, М.К. Ткаченко // *Вісн. Східноукр. націон. ун-ту ім. В. Даля*. 2017. № 7 (237). С. 63-70.
18. Соколов В.І., Степанова О.Г., Батурін Є.О. Дослідження динамічних характеристик електрогідролічного приводу технологічного обладнання. *Вісн. Східноукр. націон. ун-ту ім. В. Даля*. 2019. № 1(249). С. 55-60.
19. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. Москва: Дорфа, 2003. 840 с.
20. Sokolov, V.: Diffusion of Circular Source in the Channels of Ventilation Systems. In: *Advances in Engineering Research and Application*. ICERA 2018. Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 63, pp. 278-283. Springer, Cham (2019).
21. Sokolov, V.: Transfer functions for shearing stress in nonstationary fluid friction. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019)*. ICIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 1, pp. 707-715. Springer, Cham (2020).
22. Соколов В.І., Кроль О.С., Єпіфанова О.В. Гідроліка. Северодонецьк: СНУ ім. В. Даля, 2017. 160 с.
23. Sokolov, V.: Dynamics of Positioning Process for Hydraulic Drive Output Link by Distributor with Closed Center. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021)*. ICIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 2, pp. 715-723. Springer, Cham (2022).
24. Емцев Б.Т. Техническая гидромеханика. Москва: Машиностроение, 1987. 440 с.
25. Sokolov, V.: Hydrodynamics of Flow in a Flat Slot with Boundary Change of Viscosity. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020)*. Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 2, pp. 1172-1181. Springer, Cham (2021).

References

1. Popov D. N. *Mekhanika gidro- i pnevmoprivodov: ucheb. dlya vuzov*. Moskva: MGTU im. N. E. Baumana, 2005. 320 s.
2. Petrakov Yu.V. *Avtomatichne upravlinnya protsesami obrobki materialiv rizannyam: navchalnyi posibnik*. KiYiv: UkrNDIAT, 2003. 383 s. Petrakov Ju.V. (2003).
3. Kovalenko A. A., Sokolov V.I., Uvarov P.E., Pazin V.V. *Osnovy ob'emnogo gidravlicheskogo privoda stroitelnykh i dorozhnykh mashin*. Lugansk: DonGASA. 1999. 137 s.
4. Sveshnikov V.K. (2008). *Stanochnye gidroprivody [Machine tool hydraulic drives]*. Mashinostroenie.
5. Rydberg K.-E. *Hydraulic Servo Systems: Dynamic Properties and Control*. Linköping University Electronic Press, Linköping, 2016.
6. Sokolov, V., Porkuian, O., Krol, O., Baturin, Y.: Design Calculation of Electrohydraulic Servo Drive for Technological Equipment. In: *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III*. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 1, pp. 75-84. Springer, Cham (2020).
7. Sokolov, V., Porkuian, O., Krol, O., Stepanova, O.: Design Calculation of Automatic Rotary Motion Electrohydraulic Drive for Technological Equipment. In: *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV*. DSMIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 1, pp. 133-142. Springer, Cham (2021).
8. Fedorets V.A., Pedchenko M.N., Pichko A.F., Pe-resadko Yu.V., Lyisenko V.S. *Gidroprivody i gidropnevmoaavtomatika stankov*. Kiev: Vyssh. shkola, 1987. 375 s.
9. Navrotsky K.L. *Teoriya i proektirovanie gidro- i pnevmoprivodov*. Moskva: Mashinostroenie, 1991. 384 s.
10. Sokolov, V., Krol, O., Stepanova, O., Tsankov, P.: Dynamic characteristics of rotary motion electrohydraulic drive with volume regulation. *Comptes rendus de l'Academie bulgare des Sciences* 73(5), 691-702 (2020).
11. Kovalenko A.A. *Osnovy tehnikeskoy mehaniki zhidkostej i gazov: uchebnoe posobie dlja vuzov*/ A.A. Kovalenko, V.I. Sokolov, A.H. Dymnich, P.E. Uvarov. Lugansk: VUGU, 1998. 272 s.
12. Sokolov, V., Rasskazova, Y.: Automation of control processes of technological equipment with rotary hydraulic drive. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 2(2(80)), 44–50 (2016).
13. Sokolov, V., Krol, O., Romanchenko, O., Kharlamov, Y., Baturin, Y.: Mathematical model for dynamic characteristics of automatic electrohydraulic drive for technological equipment. *Journal of Physics: Conference Series* 1553 012013 (2020).
14. Sokolov V., Azarenko N., Sokolova Ya. Simulation of the power unit of the automatic electrohydraulic drive with volume regulation // *TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture*. Vol. 12. N 4. 2012. Lublin, Poland. pp. 268 - 273.
15. Sokolova, Y., Tavanuk, T., Greshnoy, D.: Linear modeling of the electrohydraulic watching drive. *TEKA Comm. Mot. Energ. Agric.* XIB, 167–176 (2011).
16. Popov D.N. (1987) *Dinamika i regulirovanie gidro- i pnevmosistem*. Mashinostroenie.

17. Sokolov V.I. Rozrobka ta doslidzhennia systemy avtomatichnoho keruvannya tekhnologichnym obladnanniam z hidropriyodom obertalnoho rukhu / V.I. Sokolov, O.H. Stepanova, Ya.I. Stepchuk, D.Iu. Kavun, M.K. Tkachenko // Visn. Skhidnoukr. natsion. un-tu im. V. Dalia. - 2017. - № 7 (237). - S. 63-70.
18. Sokolov V.I., Stepanova O.G., Baturin E.O. Doslidzhennya dinamichnih harakteristik elektrogidravlichnogo privodu tekhnologichnogo obladnannya. Visn. Skhidnoukr. natsion. un-tu im. V. Dalia. 2019. № 1(249). S. 55-60.
19. Loytsyanskiy L.G. Mekhanika zhidkosti i gaza. Moskva: Dorfa, 2003. 840 s.
20. Sokolov, V.: Diffusion of Circular Source in the Channels of Ventilation Systems. In: Advances in Engineering Research and Application. ICERA 2018. Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 63, pp. 278-283. Springer, Cham (2019).
21. Sokolov, V.: Transfer functions for shearing stress in nonstationary fluid friction. In: Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). ICIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 1, pp. 707-715. Springer, Cham (2020).
22. Sokolov V., Krol O., Yepifanova O. Hydraulics. Severodonetsk: V. Dahl EUNU, 2017. 160 s.
23. Sokolov, V.: Dynamics of Positioning Process for Hydraulic Drive Output Link by Distributor with Closed Center. In: Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021). ICIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 2, pp. 715-723. Springer, Cham (2022).
24. Emtsev B.T. Tehnicheskaya gidromekhanika. Moskva: Mashinostroenie, 1987. 440 s.
25. Sokolov, V.: Hydrodynamics of Flow in a Flat Slot with Boundary Change of Viscosity. In: Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 2, pp. 1172-1181. Springer, Cham (2021).

Sokolov V.I., Baturin Y.O. Calculation of shearing stress for nonstationary fluid friction

The important parameter in the calculation of hydromechanical processes is the force of viscous fluid friction, which is characterized by shearing stress arising in the working environment, which comes into contact with the surface of the moving element of the actuator, control, distribution or auxiliary hydraulic device. In the presence of a gap between the surfaces of the elements, the shearing stresses occur during the relative motion of these surfaces and the movement of the medium under the influence of the pressure drop. Traditional

approaches to the construction of mathematical models of nonstationary hydromechanical processes are largely based on the fact that real flows are replaced by a sequence of time-varying flows with a quasi-stationary distribution of hydrodynamic quantities over the section. This allows you to enter into the calculation of the coefficients and characteristics obtained for stationary flows. In fact, the structure of the nonstationary flow differs from the quasi-stationary one, and it is not always known how and under what conditions such a difference can affect the change of hydrodynamic characteristics. Therefore, the nonstationary plane laminar motion of incompressible fluid in the gap between the moving and a fixed elements in the Cartesian coordinate system is considered. The solution of the equation of motion in partial derivatives is fulfilled using the Laplace transform. The dependence in the operator form for the shearing stress for nonstationary fluid friction is obtained. The transfer functions for the shearing stress of the velocity of the moving element and the pressure gradient are determined. Based on the analysis of amplitude-frequency characteristics, the boundaries of a quasi-stationary approach are established for calculating the forces of nonstationary viscous friction on the moving elements of hydraulic devices. The solution of the equation of motion in partial derivatives is fulfilled using the Laplace transform. The approximate transfer functions for the nonstationary shearing stress are obtained, which allow to establish the connection between the originals in the form of ordinary linear differential equations. The dependence for the shearing stress under nonstationary fluid friction is proposed, which takes into account the moving surface acceleration, which makes it possible to increase the accuracy of calculating the dynamic characteristics for hydraulic systems.

Keywords: Fluid friction, shearing stress, equation of motion, Laplace transform, transfer function.

Соколов Володимир Ілліч – д.т.н., проф., завідувач кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк), sokolov@snu.edu.ua

Батурін Євген Олександрович – аспірант кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк), baturin2307@gmail.com

Чернікова Олена Миколаївна – бакалавр, студент групи ПМЕ-20д, факультет інженерії, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк), chernikovahm@gmail.com

Стаття подана 10.01.2022 р.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-272-2-74-81>

УДК 066.015.23

АНАЛІЗ РОБОТИ ТЕРІЛОК ПРОВАЛЬНОГО ТИПУ З ВІЛЬНИМ ПЕРЕРІЗОМ ДО 25 %

Тараненко Г.В.

ANALYSIS OF THE WORK OF DUAL-FLOW SIEVE TYPE PLATES WITH FREE SECTION UP TO 25 %

Taranenko G.V.

В статті розглянута робота тарілок провального типу з вільним перерізом до 25 %. На гідродинамічні характеристики тарілок провального типу найбільше впливає їх вільний переріз. Тарілки дозволяють використовувати їх при роботі з забрудненими середовищами, так як прохід пари і рідини, через отвори що чергується, забезпечує їм дію, що самоочищує. розглянути гідродинамічні характеристики газорідного шару на тарілці провального типу на основі рівняння Бернуллі в трьох перерізах. Перше, на рівні плато тарілки, друге – на рівні $H \approx 0,1$ м від плато тарілки та третє – на виході з газорідного шару. Було встановлено, що є три режими роботи тарілок провального типу. При низьких витратах газу спостерігається режим змочування, коли відбувається контакт газу з рідиною, яка затримується на тарілці. При подальшому збільшенні витрати газу розвивається барботажний режим, у якому газ проходить через рідину, як окремі бульбашки. Відбувається збільшення висоти піни за рахунок рівномірного потоку газу через отвори тарілки. Ще більш велике збільшення витрат газу та рідини призводить до розвитку пінного режиму. Відзначено, що на тарілках провального типу можна виокремити три режими роботи: режим однорідного барботажного шару; режим рухомого газорідного шару; режим руйнування газорідного шару. У колонних з невеликим діаметром $D = 0,057$ і $0,15$ м і звичайним вільним перерізом ($f < 0,25$) газорідний шар при швидкості, що перевищує w_{max} , починає різко збільшуватися до його виходу через верх колони. У колоні промислового розміру $D = 2$ м, при збільшенні швидкості газу вище w_{max} через частину рідини на тарілці газ взагалі не барботується, а через іншу частину тарілки газ проходить з більшою швидкістю, ніж середня швидкість, розрахована на повний переріз колони. Показана особливість роботи таких масообмінних тарілок на відміну від тарілок з великим вільним перерізом > 30 %. Робота тарілок з вільним перерізом до 25 %, пов'язана з параметром T , що являє собою відношення суми периметрів всіх отворів плато тарілки до її діаметра.

Ключові слова отвір, параметр, вільний переріз, діаметр, тарілка провального типу

Вступ У сучасній промисловості широко використовуються тарілки провального типу для здійс-

нення процесів абсорбції та ректифікації. На гідродинамічні характеристики тарілок провального типу найбільше впливає їх вільний переріз. При дослідженні тарілок провального типу необхідно звертати увагу, як впливає вільний переріз тарілок на їх гідродинамічні характеристики.

Постановка проблеми. Метою роботи є дослідження гідродинамічних характеристик тарілок провального типу з вільним перерізом до 25%. Це є найбільше розповсюджений тип тарілок, який використовується в промисловості. Тому дослідження таких тарілок, з метою удосконалення методики їх розрахунку, є актуальною задачею.

Тарілки дозволяють використовувати їх при роботі з забрудненими середовищами, так як прохід пари і рідини, через отвори що чергується, забезпечує їм дію, що самоочищує [1].

Крім цього, розглянути гідродинамічні характеристики газорідного шару на тарілці провального типу на основі рівняння Бернуллі в трьох перерізах. Перше, на рівні плато тарілки, друге – на рівні $H \approx 0,1$ м від плато тарілки та третє – на виході з газорідного шару.

Визначити розрахунок точки біфуркації газорідного шару за діаметром отворів у тарілці провального типу $d_0 = 0,012$ м.

Провести дослідження гідродинамічних характеристик тарілок провального типу з діаметром отвору $d_0 = 0,023$ м та вільним перерізом $f = 0,16$.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В [2] були проведені дослідження тарілок провального типу в скрубєрі на системі повітря-вода. Вивчали режими роботи таких тарілок. Було встановлено, що є три режими роботи тарілок провального типу. При низьких витратах газу спостерігається режим змочування, коли відбувається контакт газу з рідиною, яка затримується на тарілці. При подальшому збільшенні витрати газу розвивається барботажний режим, у якому газ проходить через рідину, як окремі буль-

башки. Відбувається збільшення висоти піни за рахунок рівномірного потоку газу через отвори тарілки. Ще більш велике збільшення витрат газу та рідини призводить до розвитку пінного режиму.

В [3] повідомлюється, що на тарілках провального типу можна виокремити три режими роботи:

- режим однорідного барботажного шару;
- режим рухомого газорідинного шару;
- режим руйнування газорідинного шару.

Режими роботи діють у певному діапазоні роботи масообмінної тарілки.

Для щільності зрошення (L) існують мінімальна (w_{min}) та максимальна (w_{max}) швидкості газу, які характеризують діапазон стійкої роботи тарілки.

За швидкість w_{min} приймають швидкість газу, при $L = \text{const}$, при якій на тарілці провального типу з'являється стійкий барботажний шар.

При швидкості w_{max} газорідинний шар на тарілці починає руйнуватися.

У колонних з невеликим діаметром $D = 0,057$ і $0,15$ м і звичайним вільним перерізом ($f < 0,25$) газорідинний шар при швидкості, що перевищує w_{max} , починає різко збільшуватися до його виходу через верх колони.

У колоні промислового розміру $D = 2$ м, при збільшенні швидкості газу вище w_{max} , через частину рідини на тарілці газ взагалі не барботується, а через іншу частину тарілки газ проходить з більшою швидкістю, ніж середня швидкість, розрахована на повний переріз колони.

На рис. 1 представлена структура барботажного шару, що характерна для висоти барботажного шару до $H \approx 0,1$ м.

Як видно з рисунка, барботажний шар характеризується однорідною у всіх напрямках структурою комірчастої піни, горизонтальною поверхнею барботажного шару, висота якої не змінюється в часі, для одних і тих же швидкостей газової та рідкої фаз.

Це свідчить, що у барботажному шарі сили тяжкості перевищують сили інерції рідини. Можна вважати, що барботажний шар в цьому режимі, як система, що самоорганізується, знаходиться в рівновазі, так як сили гідростатичного тиску і масові сили постійні в часі в будь-якій точці барботажного шару. Вектор швидкості руху рідини має один напрямок – зверху донизу. Так як на газорідинний шар не діють зовнішні сили, а діють лише сили, в результаті яких він утворений, то таку систему можна назвати, системою, що самоорганізується. Крім того, барботажний шар практично симетричний щодо осей координат, початок яких розташовується на центральній вертикальній осі тарілки провального типу.

При досягненні висоти газорідинного шару більшої $H \approx 0,1$ м він втрачає стійкість (рис. 2). Утворюється рухомий газорідинний шар, який характеризується відсутністю структурованої пористої піни. Вільна поверхня газорідинного шару криволінійна. Її висота змінюється в часі для тих самих швидкостей газової і рідкої фаз і має амплітуду і частоту. У газорідинному шарі спостерігаються флуктуації та-

ких параметрів, як гідравлічний опір та висота газорідинного шару, а також швидкостей руху рідини, що мають хаотичний напрямок. Це свідчить, що сили інерції рідини у такому газорідинному шарі перевищують сили тяжкості.



Рис. 1. Робота тарілки провального типу у режимі однорідного барботажного шару: $L = 12,7 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, $w = 0,72 \text{ м/с}$.



Рис. 2. Робота тарілки провального типу в режимі рухомому газорідинного шару: $L = 12,7 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, $w = 0,83 \text{ м/с}$.

Крім цього, газорідинний шар втрачає симетричність щодо осей координат, початок яких розташовується на центральній вертикальній осі тарілки провального типу

У [4] запропоновано розглядати газорідинний шар на тарілці провального типу, як місцевий гідралічний опір для проходження як газу, так і рідини. Автори записали рівняння Бернуллі для двох перерізів газорідинного шару, один з яких розташовується в площині тарілки, а другий на виході з шару піни. Зазначається, що для потоку газу істотним є те, що його швидкість при проходженні через шар піни різко змінюється від швидкості газу в отворах тарілки w_0 до швидкості газу, w , при виході його з шару піни. При цьому зазвичай $w_0^2 > w^2$ в 25 – 100 разів.

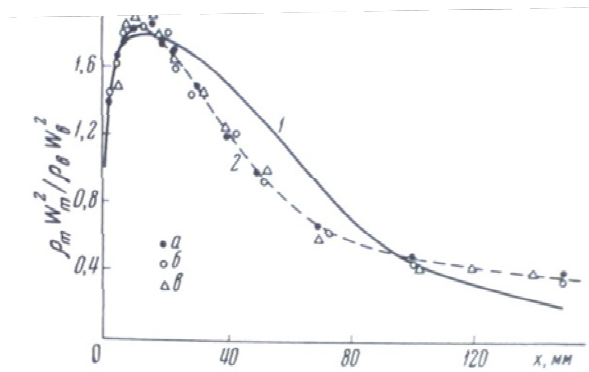


Рис. 3. Порівняння витоку повітряного струменя через отвір у стінці, в повітря і воду ($d_0 = 10$ мм, $w_0 = 43$ м/с); 1 – повітря – повітря, 2 – повітря – вода: а – 300; б – 200; в – 150 мм; х – відстань до площини отвору, мм

На рис. 3 наведені графіки порівняння вимірювання динамічних напорів на осі повітряних струменів, що витікають через отвір у стінці, повітря і воду, для отвору 10 мм і швидкості $w_0 = 43$ м/с.

З графіків видно, що обидві криві близькі у всій області вимірів. Це дозволяє зробити висновок, що ядро газорідинного струменя на досить великих відстанях від отвору залишається газовим.

Аналіз даних [5] показує, що характер витоку газу з отвору в стінці, у воду і повітря однаковий. Динамічний напір має максимальне значення поблизу отвору в стінці і приймає мінімальне значення на відстані близько 100 мм від отвору в стінці.

В [6] були проведені вимірювання динамічного тиску в одиночному отворі «сухої» тарілки провального типу з вільним перерізом $f = 16,3, 25$ і $35,6$ %.

Динамічне тиск вимірювали датчиком, який являв собою бронзову трубку довжиною 0,9 м і зовнішнім діаметром 0,008 м. Всередину трубки була поміщена мідна трубка діаметром 0,004 м і довжиною 1 м. Нижній кінець датчика був запаєний так, що внутрішня трубка розташовувалась по центру. Внутрішня трубка призначалася для вимірювання повної

енергії газового потоку. У нижній частині датчика, в безпосередній близькості від входу у внутрішню трубку, у зовнішній трубці були просвердлені чотири отвори діаметром 0,002 м для відбору статичного тиску газу.

Трубки для відбору повного та статичного тиску приєднували до мікроманометру, який показував різницю між повним і статичним тиском, тобто. динамічний тиск.

Датчик розташовували на осі колони над центром тарілки провального типу. Його можна було встановлювати різною висотою від плато тарілки.

Геометричні характеристики досліджених тарілок провального типу наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Геометричні характеристики тарілок провального типу

Номер тарілки	Вільний переріз f , %	Діаметр отворів, d_0 , м	Число отворів, n , од.
1	16,3	0,023	1
2	25	0,0285	1
3	35,6	0,034	1
4	14,6	0,005	19
5	25,4	0,005	33
6	36,1	0,005	47

Діаметр колони, у який досліджувалися тарілки, становив $D = 0,057$ м.

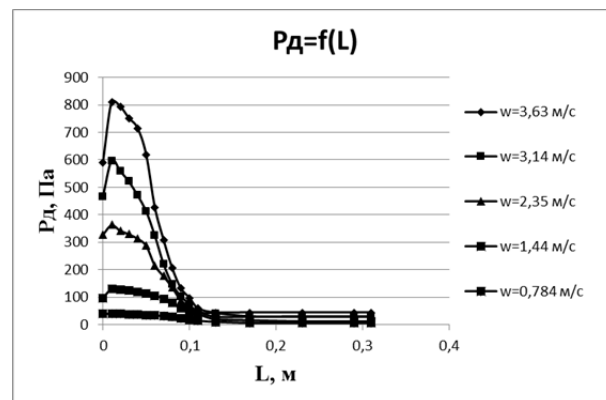


Рис. 4. Графіки залежності динамічного тиску (P_d , Па) від відстані до плато тарілки (L , м) для різних значень швидкості газу в перерізі колони (w , м/с). Тарілка № 1, табл. 1

На рис. 4 представлені графіки зміни динамічного тиску на різній відстані від плато тарілки (з одним отвором) для низки швидкостей газу в перерізі колони.

В [6] були проведені вимірювання статичного тиску на різній відстані від плато тарілки.

Результати вимірів представлені на рис. 5

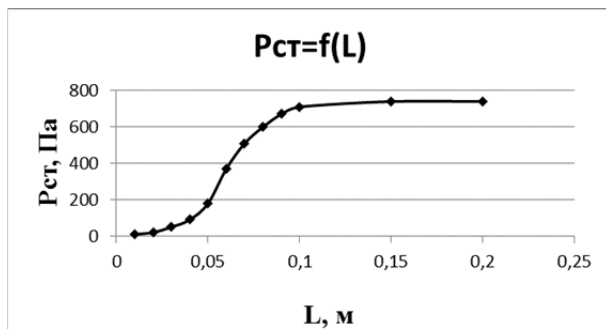


Рис. 5. Графік залежності локального статичного тиску ($P_{ст}$, Па) від відстані до плато тарілки (L , м) для швидкості газу в перерізі колони $w = 3,6$ м/с. Діаметр отвору становив $d_0 = 0,023$ м.

З графіків видно, що різка зміна динамічного (рис. 4) та статичного тиску (рис. 5) газового струменя відбувається на відстані близько $L = 0,1$ м від плато тарілки.

В [7] було запропоновано рівняння (1) для розрахунку точки біфуркації барботажного шару на тарілках провального типу

$$\lg\left(\frac{Y}{T^{0,5}}\right) = 0,0751 - 1,68 \cdot X. \quad (1)$$

Рівняння (1) привели до вигляду рівняння (2)

$$Y/T^{0,5} = 1,188 \cdot 10^{-1,68 \cdot X} \quad (2)$$

Значення Y визначаємо за рівнянням (3)

$$Y = \frac{w^2}{g \cdot d_0 \cdot \Gamma^2} \cdot \frac{\rho_n}{\rho_p} \cdot \left(\frac{\mu_p}{\mu_n}\right)^{0,16} \quad (3)$$

Значення X визначаємо за рівнянням (4)

$$X = \left(\frac{G_p}{G_n}\right)^{1/4} \cdot \left(\frac{\rho_n}{\rho_p}\right)^{1/8} \quad (4)$$

Шукане значення вільного перерізу тарілки провального типу визначаємо методом послідовного наближення за рівняннями (2) – (4).

Фізико-хімічні константи в рівняннях (2) – (4) враховували з урахуванням кореляції Шервуда [9, 10].

До рівняння (2) входить параметр T , який є відношенням суми периметрів всіх отворів плато тарілки до її діаметру [3]. Таким чином, параметр T є функцією таких геометричних параметрів тарілки провального типу, як її діаметр, вільний переріз і діаметр отворів плато тарілки. Це дає можливість за рівняннями (2) – (4) розраховувати вільний переріз тарілок провального типу за заданою швидкістю, розрахованою на повний переріз колони, для різних діаметрів колони. Отже, можливе гідродинамічне моделювання тарілок провального типу з різними геометричними характеристиками.

У [11] говориться, що ефективність масопереносу при дистиляції пов'язана з динамікою руху рідини на тарілках провального типу. Це визначає структуру газорідного шару та область контакту між газовою та рідкою фазами. Таким чином, режими роботи тарілок безпосередньо впливають на їхню ефективність. Більшість із цих досліджень вивчають перехід від пінного режиму роботи до струменевого режиму.

Традиційно сприймається картина, що пінний режим складається з бульбашок у рідині, яка є суцільною фазою і струменевий режим, який складається з крапель у газовій безперервній фазі.

Ці визначення пінного і струменевого режимів передбачає раптову зміну природи двофазної суміші та передбачає два окремі вирази міжфазної області для прогнозування ефективності масообмінної тарілки для цих двох режимів.

У [11] запропоновано модель структури піни на тарілці провального типу діаметром 0,153 м дистиляційної колони. На тарілці піна визначена як комбінація бульбашок і безперервних струменів газу.

Ця ефективна модель застосовується як для піни, так і режиму розпилення. У ній підсумкова ефективність оцінюється шляхом складання вкладів як бульбашок, так і струменів, які присутні в дисперсії.

$$E_{OG} = (1 - f_i)E_B + f_iE_j \quad (5)$$

де E_{OG} – загальна точка ефективності;

E_B – загальна точка ефективності барботажно́ї зони;

E_j – загальна точка ефективності для струменевої зони;

f_i – об'ємна частка газу, що обходить бульбашки у вигляді безперервних струменів;

$$E_B = (1 - FSB)E_{LB} + FSB \cdot E_{SB} \quad (6)$$

де E_{LB} – загальна точка ефективності великих бульбашок;

E_{SB} – загальна точка ефективності для малих міхурів;

FSB – частка малих міхурів.

В [1] досліджено тарілки провального типу, які встановлювалися в колонах великого діаметру, в умовах дистиляції. Було запропоновано моделі прогнозування їх ефективності для тарілок з вільним перерізом 15 – 25% та діаметром отворів 12 – 25 мм. Відстань між тарілками складала 0,3 – 0,6 м.

Моделі для прогнозування ефективності були засновані на оцінці впливу величини уносу на загальну ефективність масообмінної тарілки провального типу.

Встановлено, що при високих навантаженнях на колону ректифікації, вплив уносу на ефективність масообмінних тарілок може бути виражений співвідношенням:

$$E_w/E_p = \frac{1}{1 + E_p \Psi / (1 - \Psi)} \quad (7)$$

або

$$\Psi = \frac{1-\phi}{\phi E_p + (1-\phi)} \quad (8)$$

де $\phi = E_w/E_p$ – відношення «м мокрої» ефективності (з уносом) до піку кривої «сухої» ефективності;

E_w – «мокра» ефективність;

E_p – пик кривої «сухої» ефективності;

Ψ – знижуючий фактор ефективності з уносом, у парі

В [3] проводилися дослідження ефективності роботи тарілок провального типу на стенді з колоною 0,3 м при ректифікації системи метанол-вода (50 мол.%). На стенді з колоною 0,15 м досліджували масообмін при десорбції двоокису вуглецю із води азотом.

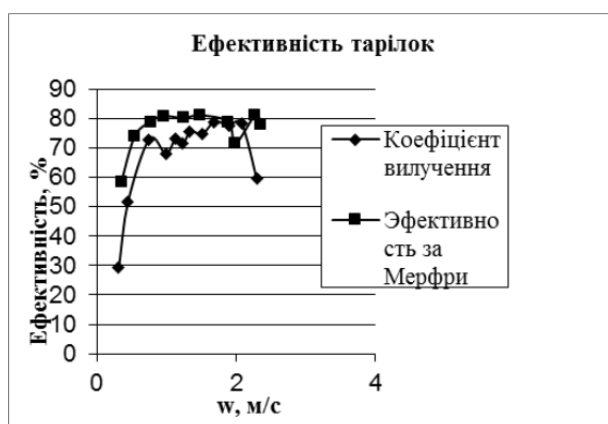


Рис. 6. Графіки залежності коефіцієнта вилучення для умови ректифікації та ефективності по Мерфрі в рідкій фазі для умов десорбції двоокису вуглецю з води азотом

В [3] також представлений, на рис. 7 графік залежності гідравлічного опору тарілки провального типу від швидкості газу в перерізі колони в умовах десорбції двоокису вуглецю з води азотом.

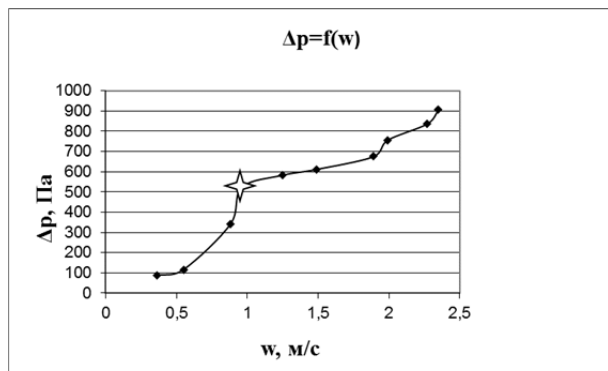


Рис. 7. Графік залежності гідравлічного опору від швидкості газу в перерізі колони в умовах десорбції двоокису вуглецю із води азотом.

Щільність зрошення $L = 12,7 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.



- Точка біфуркації

З порівняння графіків залежності ефективності та гідравлічного опору тарілок провального типу від швидкості газу в перерізі колони видно, що в режимі однорідного барботажного шару ефективність та гідравлічний опір зростають пропорційно швидкості газу в перерізі колони. Максимальна ефективність масопереносу тарілок досягається у точці біфуркації. Як зазначалося раніше, при цьому режимі пінний шар відрізняється стабільністю своїх параметрів у часі. Для розрахунку кінетичних характеристик тарілок, у цьому випадку, застосовують рівняння, що базуються на дифузійній моделі перенесення маси через поверхню розділу фаз.

Після точки біфуркації, в режимі рухомого газорідного шару, гідравлічний опір та ефективність мало залежать від швидкості газу (пара) у перерізі колони. Параметри газорідного шару нестабільні у часі (вони мають амплітуду та частоту зміни своїх значень у довільно вибраній точці шару). Для розрахунку кінетичних параметрів масопередачі в цьому режимі обґрунтовано використовувати рівняння, що засновані на моделях оновлення поверхні масопереносу з використанням таких параметрів як θ (час контакту або період оновлення елементів поверхні контакту фаз) і s (швидкість оновлення поверхні).

Зі сказаного можна зробити висновок, що для промислового використання тарілок провального типу, можна рекомендувати використовувати роботу тарілок у режимі рухомого газорідного шару, коли ефективність тарілок провального типу максимальна, а гідравлічний опір тарілок не збільшується.

З літературного огляду можна зробити наступні висновки. Газорідний шар на тарілці провального типу слід розглядати як місцевий опір для проходження як газу, так і рідини [4]. Крім двох перерізів, які розглядаються в роботі, необхідно розглянути характерний переріз, який розташовується на відстані $H \approx 0,1 \text{ м}$ від її плато [3].

У цьому перерізі [6] відбувається різка зміна динамічного (рис. 4) та статичного тиску (рис. 5) газового струменя, що витікає в газову фазу, з одиночного отвору в тарілці, динамічний тиск різко зменшується, а статичний тиск різко збільшується.

В роботі [5] розглядався виток газового струменя в рідину і для порівняння – виток газового струменя в газу. Робиться висновок, що ядро на доволі великих відстанях від отвору залишається газовим.

Таким чином, оскільки виток газового струменя в рідину і газ практично однаковий, висновки, зроблені в [5], які стосувалися гідродинаміки витоку газового струменя в газ і рідину, можна поширити на висновки, зроблені в [6], які стосувалися витоку газового струменя в газову фазу.

Таким чином, оскільки виток газового струменя в рідину і газ практично однаковий, висновки, зроблені в [5], які стосувалися гідродинаміки витоку газового струменя в газ і рідину, можна поширити на

висновки, зроблені в [6], які стосувалися витoku газового струменя в газову фазу.

Численні експерименти, проведені в [3], на тарілках провального типу з різним вільним перерізом, при різних навантаженнях по газу та рідині, які були проведені в колонах різного діаметра, показують, що біфуркація газорідинного шару здійснюється при висоті газорідинного шару $H \approx 0,1$ м.

На цій висоті кінетична енергія газового потоку переходить у кінетичну енергію рідини на тарілці провального типу, здійснюючи його турбулізацію, що говорить про перехід режиму однорідного барботажного шару до режиму рухомого газорідинного шару.

У [7, 8] запропоновано рівняння (2) – (4) для розрахунку межі роботи в точці біфуркації газорідинного шару на тарілках провального типу.

Також за рівняннями (2) – (4) можна визначити значення вільного перерізу тарілки провального типу методом послідовного наближення.

Фізико-хімічні константи в рівняннях (2) (4) враховували з урахуванням кореляції Шервуда [9, 10].

В [11] досліджувалась ефективність тарілок провального типу в дистиляційній колоні діаметром 0,153 м. Загальна ефективність оцінювалася за рівняннями (5) та (6) у яких вона складалася з ефективності барботажної та струминної зон. Причому, у свою чергу, ефективність барботажної зони складалася з ефективності великих бульбашок та ефективності для малих бульбашок пари. У [1] було проведено дослідження ефективності тарілок провального типу за умов ректифікації різних бінарних систем.

Ефективність масообмінних тарілок визначали за рівняннями (7) і (8) по відношенню до «мокрою» ефективності (з уносом) до піку кривої «сухої» ефективності.

Геометричний параметр T визначає гідравлічні характеристики тарілок провального типу і його можна використовувати для фізичного моделювання тарілок із різними геометричними характеристиками.

В [3] проводилися дослідження ефективності роботи тарілок провального типу в умовах ректифікації та десорбції. Встановлено, що

– газорідинний шар на тарілці провального типу, відповідно до основних понять синергетики, можна розглядати, як систему, що самоорганізується, яка при певних навантаженнях по газу рідини, переходить з рівноважного стану в нерівноважний стан, що визначає режими роботи тарілки.

– максимально ефективна робота тарілок провального типу спостерігається у режимі рухомого газорідинного шару;

Діаметр отвору входить у визначення параметра T , рівняння (2), отже, впливає на гідравлічний розрахунок тарілок. Таким чином, величина діаметра отвору впливає на гідродинамічні та кінетичні характеристики тарілок провального типу.

Необхідні експериментальні дослідження впливу діаметра отвору на гідравлічні характеристики тарілок провального типу.

Розрахунок експериментальних даних. У цій роботі проведено дослідження тарілок провального типу з вільним перерізом $f = 16$ %. Діаметр отворів становив $d_0 = 0,005$ та $0,023$ м, на лабораторній установці, опис якої наведено у [3].

Діаметр колони становив $D = 0,057$ м. Вимірювалися гідравлічний опір тарілки, та висоту газорідинного шару. Дослідження проведено в широкому діапазоні зміни навантажень газу та рідини на модельній системі повітря – вода.

Результати досліджень

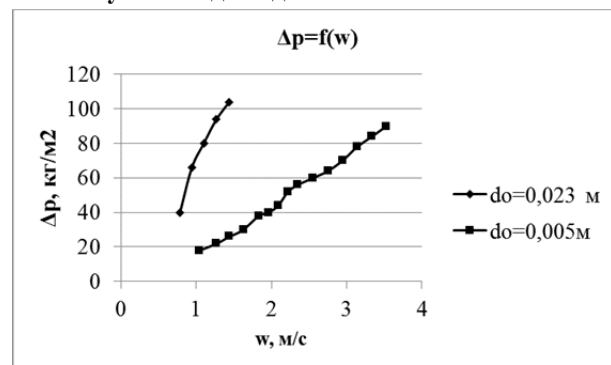


Рис. 8. Графік залежності гідравлічного опору від швидкості газу в перерізі колони за умови системи вода – повітря. Щільність зрошування $L = 3,9$ м³/(м²·ч)

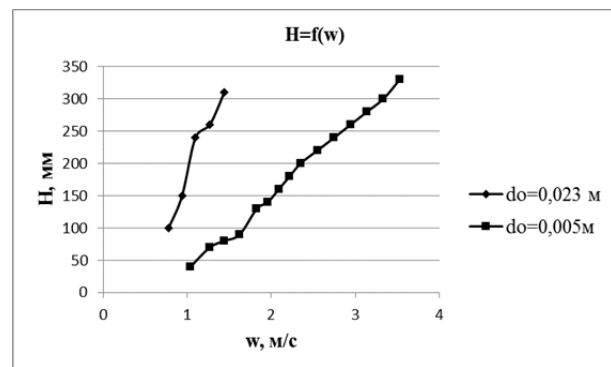


Рис. 9. Графік залежності висоти газорідинного шару від швидкості газу в перерізі колони за умови системи вода – повітря. Щільність зрошування $L = 3,9$ м³/(м²·ч)

З графіків, рис. 8 видно, що гідравлічний опір тарілки провального типу з отвором, $d_0 = 0,023$ м, значно більше гідравлічного опору тарілки з отворами, $d_0 = 0,005$ м при однаковому вільному перерізі обох тарілок. В [1] також відзначається збільшення гідравлічного опору тарілок провального типу зі збільшенням діаметра отворів при однаковому вільному перерізі тарілок, для тих самих умов проведення експериментів.

З графіків, рис. 8 видно, що гідравлічний опір тарілки провального типу з отвором, $d_0 = 0,023$ м, значно більше гідравлічного опору тарілки з отворами, $d_0 = 0,005$ м при однаковому вільному перерізі

обох тарілок. В [1] також відзначається збільшення гідравлічного опору тарілок провального типу зі збільшенням діаметра отворів при однаковому вільному перерізі тарілок, для тих самих умов проведення експериментів.

З графіків, рис. 9 видно, що у тарілок провального типу з отвором $d_0 = 0,023$ м відсутній режим однорідного барботажного шару, так як тарілка вступає в роботу, коли висота газорідного шару перевищує $H \approx 0,1$ м.

Тарілки з отворами, $d_0 = 0,005$ м, вступають у роботу при висоті газорідного шару значно менше висоти $H \approx 0,1$ м. На таких тарілках також існує режим однорідного барботажного шару.

Захлинання тарілок з отвором, $d_0 = 0,023$ м, настає при значно менших швидкостях газу в перерізі колони, ніж у тарілках з отворами, $d_0 = 0,005$ м, за інших рівних умов.

Висновки

1. Гідродинамічні характеристики газорідного шару на тарілці провального типу розглядається на основі рівняння Бернуллі у трьох перерізах. Перший, на рівні плато тарілки, другий – на рівні $H \approx 0,1$ м від плато тарілки та третій – на виході з газорідного шару.

У другому перерізі відбувається біфуркація газорідного шару.

2. Рівняння (2) – (4) призначені для розрахунку точки біфуркації газорідного шару на тарілках провального типу при діаметрі отворів у тарілці $d_0 = 0,012$ м.

3. Проведено дослідження гідродинамічних характеристик тарілок провального типу з діаметром отвору $d_0 = 0,023$ м та вільним перерізом $f = 0,16$.

4. Необхідні подальші дослідження з метою отримання рівнянь для розрахунку точки біфуркації тарілок провального типу з діаметром отворів $d_0 = 0,025$ м

Література

1. Garcia J.A., Fair J.R. Distillation sieve trays without downcomers. prediction of performance characteristics. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2002. № 41. P. 1632-1640.
2. Kurella Swamy B.C. Meikap Hydrodynamic characteristics of a three-stage dual-flow sieve plate scrubber. *South African Journal of Chemical Engineering.* 2017. № 23. P. 91-97.
3. Тараненко Г.В. Гидравлические и массообменные характеристики тарелок провального типа с различным диаметром отверстий: монография. Луганск: 2013. 175 с.
4. Касаткин А. Г., Дытнерский Ю. И., Попов Д. М. Гидравлические закономерности процессов на барботажных тарелках провального типа *Хим. пром.* 1961, № 7, С. 482 – 491.
5. Васильев А. С, Талачев В. С., Павлов В. П., Плановский А. Н. Закономерности истечения струи газа в жидкость. *ТОХТ.* 1970, том IV, № 5, С. 727 – 735.

6. Тараненко Г.В. Дослідження витікання газу з отвору в тарілці провального типу. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля.* 2021. № 1 (265). С. 124-127.
7. Taranenko G. Calculation of the lower operating limit of dual-flow plates with different geometrical characteristics. 2015. *ScienceRise.* Vol. 3, Issue 2 (8). – P. 67–73.
8. Тараненко Г.В. Гидродинамическое моделирование режимов работы тарелок провального типа, установленных в колоннах различного диаметра 2017. *ScienceRise.* Том 6, № 1(35) С. 34-38.
9. Sherwood T. K., Shipley G. H., Holloway F. A. L. Flooding Velocities in Packed Columns *Industrial & Engineering Chemistry.* 1938. Vol. 30, Issue 7. P. 765–769.
10. Касаткин А. Г., Дытнерский Ю. И., Умаров С. У. К расчёту колонн с провальными тарелками. *Химическая промышленность.* 1958. № 3. С. 38–45.
11. Syeda S. R., Afacan A., Chuang K. T. A Fundamental Model for Prediction of Sieve Tray Efficiency. *Chemical Engineering Research and Design.* 2007. Vol. 85(A2), Issue 2. P. 269–277.

References

1. Garcia J.A., Fair J.R. Distillation sieve trays without downcomers. prediction of performance characteristics. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2002. № 41. P. 1632-1640.
2. Kurella Swamy B.C. Meikap Hydrodynamic characteristics of a three-stage dual-flow sieve plate scrubber. *South African Journal of Chemical Engineering.* 2017. № 23. P. 91-97.
3. Тараненко Г.В. Гидравлические и массообменные характеристики тарелок провального типа с различным диаметром отверстий: монография. Луганск: 2013. 175.
4. Kasatkyn A. H., Dytynskyi Yu. Y., Popov D. M. гидравлические закономерности процессов на барботажных тарелках провального типа *Khym. prom.* 1961, № 7, S. 482 – 491.
5. Vasylev A. S, Talachev V. S., Pavlov V. P., Planovskiy A. N. Zakonomernosti ystecheniya struy haza v zhydkost. *ТОХТ.* 1970, том IV, № 5, S. 727 – 735.
6. Taranenko H.V. Doslidzhennia vytykannia hazu z otvoru v tariltsi provalnoho typu. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia.* 2021. № 1 (265). S. 124-127.
7. Taranenko G. Calculation of the lower operating limit of dual-flow plates with different geometrical characteristics. 2015. *ScienceRise.* Vol. 3, Issue 2 (8). – P. 67–73.
8. Taranenko H.V. Hydrodynamicheskoe modelirovaniye rezhymov raboty tarelok provalnoho typu, ustanovlennyykh v kolonnakh razlychnoho dyametra 2017. *ScienceRise.* Tom 6, № 1(35) S. 34-38.
9. Sherwood T. K., Shipley G. H., Holloway F. A. L. Flooding Velocities in Packed Columns *Industrial & Engineering Chemistry.* 1938. Vol. 30, Issue 7. P. 765–769.
10. Kasatkyn A. H., Dytynskyi Yu. Y., Umarov S. U. K raschetu kolonn s provalnymi tarelkamy. *Khymycheskaia promyshlennost.* 1958. № 3. S. 38–45.
11. Syeda S. R., Afacan A., Chuang K. T. A Fundamental Model for Prediction of Sieve Tray Efficiency. *Chemical Engineering Research and Design.* 2007. Vol. 85(A2), Issue 2. P. 269–277.

Taranenko G. Analysis of the work of dual-flow sieve type plates with free section up to 25 %

In industry, column apparatuses with mass transfer contacts are widely used for absorption and rectification procedures. One of the types of such devices are dual-flow sieve type plates. The design of these trays allows them to be used when working with polluted environment, since the alternating passage of vapor and liquid through the holes provides a self-cleaning effect. From the graphs, Fig. 8, it can be seen that the hydraulic resistance of dual-flow sieve type plates with a hole, $d_0 = 0,023$ m, is much greater than the hydraulic resistance of a tray with holes, $d_0 = 0,005$ m, with the same free section of both trays. In, there is also an increase in the hydraulic resistance of dual-flow sieve type plates with an increase in the diameter of the holes for the same free section of the trays, for the same experimental conditions. It is necessary to carry out studies on large diameter columns in order to determine the dependence of the hydrodynamic parameters of dual-flow sieve type plates on the diameter of the holes in the tray plateau. Dual-flow sieve type plates cymbals have been little studied abroad. It is of interest to study such trays, especially on industrial columns of small diameter. When using dual-flow sieve type plates with large hole diameters, the range of their stable operation on columns of small diameter is reduced. Such trays are recommended to be used on large columns. The hydrodynamic characteristics

of the gas-liquid layer on a dual-flow sieve type plates are considered based on the Bernoulli equation in three sections. The first one, at the level of the tray plateau, the second one, at the level $H \approx 0,1$ m from the tray plateau, and the third one, at the outlet of the gas-liquid layer. In the second section, the bifurcation of the gas-liquid layer occurs. Equations (2) - (4) are designed to calculate the bifurcation point of the gas-liquid layer on the trays of dual-flow sieve type plates., with the diameter of the holes in the tray $d_0 = 0,012$ m. Studies of the hydrodynamic characteristics of a dual-flow sieve type plates with a hole diameter $d_0 = 0,023$ m and a free section $f = 0,16$ were carried out. Further research is needed in order to obtain equations for calculating the bifurcation point a dual-flow sieve type plates a hole diameter $d_0 = 0,025$ m. The results of the research can be used in the calculation of the a dual-flow sieve type plates.

Key words: *hole, parameter, free section, diameter, dual-flow sieve type plate.*

Тараненко Геннадій Володимирович – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк), gtaranenko@ukr.net

Стаття подана 05.03.2022 р.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-272-2-82-90>

УДК 621.793.7

ГАЗООБМІН У ДЕТОНАЦІЙНО-ГАЗОВИХ ПРИСТРОЯХ ДЛЯ НАПИЛЕННЯ ПОКРИТТІВ

Харламов Ю.О., Міщик А.В., Романченко О.В.

GAS EXCHANGE IN D-GUN'S DEVICES FOR COATING SPRAYING

Kharlamov Y.O., Mitsyk A.V., Romanchenko O.V.

Основні вимоги до детонаційно-газових установок (ДГУ) для напилення покриттів – вибухобезпечність, екологічність, стабільність роботи, висока продуктивність та ін. При технологічному застосуванні газової детонації доводиться розв'язувати проблеми швидкого та якісного змішування компонентів суміші, надійного ініціювання детонації, охолодження установок, враховувати межі детонації, міцність та вагу апаратів тощо. Етапи робочого циклу ДГУ, в тому числі процеси газообміну в детонаційних камерах згоряння, що забезпечують наповнення їх свіжою горючою сумішшю і порошком з попереднім витісненням залишкових продуктів згоряння, визначають вихідний стан свіжого заряду, що впливає на інтенсивність і характер фізико-хімічних перетворень, і цим на умови формування покриттів. Ця стаття присвячена систематизації та аналізу принципів організації газообміну в робочих камерах згоряння детонаційно-газових установок для напилення покриттів, що працюють з різними структурами робочого циклу, з виявленням принципових схем та закономірностей газообміну в робочих камерах згоряння. До основних схем газообміну віднесені наступні: з виштовхуванням залишкових продуктів згоряння продувним газом або компонентом горючої суміші; з виштовхуванням залишкових продуктів згоряння свіжою горючою сумішшю; з відкачування залишкових продуктів згоряння; комбінований газообмін з відкачуванням та продуванням залишкових продуктів згоряння; із поперечним рухом газів; зі змінним складом свіжої горючої суміші. За способом видалення залишкових газів слід розрізняти: продування стовбура інертними газами з подальшою подачею (виштовхуванням інертного газу) свіжою горючою сумішшю газів; продування стовбура повітрям або киснем з подальшою подачею свіжої горючої суміші; подача свіжої горючої суміші з безпосереднім виштовхуванням нею продуктів згоряння; подача свіжої паливної суміші з безпосереднім виштовхуванням нею продуктів згоряння через проміжну газову пробку невеликої довжини; відкачування залишкових газів зі стовбура для створення розрідження (вакууму) з наступним заповненням свіжою горючою сумішшю газів; поєднання продування (виштовхування) залишкових газів з відкачуванням. За напрямком потоку свіжої горючої суміші розрізняють її подачу: за

напрямом течії продуктів згоряння; назустріч напрямку течії продуктів згоряння; уперек напрямку течії продуктів згоряння; поєднанням зазначених вище прийомів. За місцем введення свіжої паливної суміші в стовбур розрізняють її подачу: біля закритого торця; біля відкритого торця; в середній частині стовбура; одночасно по всій довжині стовбура; поєднанням зазначених вище прийомів. Розглянуто схеми газообміну з різною циклічністю подачі газів.

Ключові слова: газообмін; горюча суміш; детонаційно-газове напилення; залишкові продукти згоряння; покриття; продувний газ; змішування газів.

Вступ. Детонація – найефективніший з усіх можливих способів прямого спалювання речовини. Саме тому нині у всьому світі активно розгортаються науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи з використання керованої детонації у нових системах реактивного руху, енергетичних установках та технологічних пальниках [1, 2].

Швидкість спалювання палива, надзвукова швидкість процесу, висока температура та підвищений тиск продуктів визначають галузі технічного використання газової детонації. Основні вимоги до детонаційно-газових установок (ДГУ) – це вибухобезпека та екологічність, стабільність роботи та висока продуктивність. При технологічному застосуванні газової детонації доводиться розв'язувати проблеми швидкого та якісного змішування компонентів суміші, надійного ініціювання детонації, охолодження установок, враховувати межі детонації, міцність та вагу апаратів тощо. [2 – 4].

Одним з перших найважливіших і добре розвинутих нині застосувань газової детонації є нанесення зносостійких, теплозахисних, електроізоляційних та інших видів порошкових покриттів на зовнішні поверхні деталей різного призначення. Суть детонаційно-газового методу напилення (ДГН), вперше запропонованого на фірмі Linde Company в середині XX століття [5, 6], полягає у нагріванні та метанні

порошкових частинок на оброблювану поверхню за допомогою газової детонації. Відсутність технологій отримання твердих зносостійких покриттів у СРСР стимулювало самостійну розробку та розвиток детонаційно-газового напилення у 1960-ті роки [5 – 7]. Детонаційно-газове напилення стало першим методом високошвидкісного газотермічного нанесення покриттів та стимулювало світову тенденцію до розробки інших високошвидкісних способів – високошвидкісного газополум'яного та плазмового, газодинамічного та ін.

Зараз розроблено та освоєно технологію ДГН покриттів з багатьох видів порошків, безперервно ведуться роботи з розширення їх номенклатури та областей застосування. Виконані та продовжують розвиватися теоретико-експериментальні дослідження, спрямовані на створення наукової бази для проєктування оптимальних технологічних процесів та обладнання для ДГН. Створено детонаційно-газові установки для нанесення покриттів (ДГУ), що відрізняються принципом дії та конструктивним виконанням. У зв'язку з цим розвиваються роботи з оцінки технологічних можливостей, переваг та недоліків окремих варіантів ДГН, створення обґрунтованих рекомендацій щодо їх застосування та подальшого вдосконалення.

Все більшу увагу при аналізі та розробці ДГН приділяється системному підходу. Якщо раніше вивчалися основні етапи робочого циклу ДГН – нагрівання та рух частинок порошку в потоці продуктів газової детонації, взаємодія частинок порошку з підкладкою, то зараз приділяють більш ретельну увагу аналізу структури робочого циклу ДГН загалом та всіх його етапів. Однак, ряд етапів робочого циклу ДГУ, наприклад, процеси газообміну в детонаційних камерах згоряння, що забезпечують наповнення їх свіжою горючою сумішшю та порошком з попереднім витісненням залишкових продуктів згоряння, визначають вихідний стан свіжого заряду, що впливає на інтенсивність та характер фізико-хімічних перетворень, які протікають у частинках порошку, та на умови формування покриттів практично не вивчені [5].

Метою статті є вивчення, аналіз та систематизація конструкцій детонаційно-газових установок для напилення покриттів, що працюють з різними структурами робочого циклу, з виявленням схем і закономірностей газообміну в робочих камерах згоряння.

Результати дослідження.

Класифікація схем газообміну. У перших патентах з детонаційно-газового напилення закладено продування стовбура інертними газами у напрямку від закритого торця до відкритого з подальшою аналогічною подачею свіжої горючої суміші газів. Проте питання газообміну в стовбурах ДГУ залишається недостатньо опрацьованим. Спрощений теоретичний аналіз газообміну було виконано раніше [5]

За способом газообміну (видалення залишкових газів) слід розрізняти: 1) продування стовбура

інертними газами з подальшою подачею (виштовхуванням інертного газу) свіжою горючою сумішшю газів; 2) продування стовбура повітрям або киснем з подальшою подачею свіжої горючої суміші; 3) подача свіжої горючої суміші з безпосереднім виштовхуванням нею продуктів згоряння; 4) подача свіжої горючої суміші з безпосереднім виштовхуванням нею продуктів згоряння через проміжний газовий затвор невеликої довжини; 5) відкачування залишкових газів зі стовбура для створення розрідження (вакууму) з подальшим заповненням свіжою горючою сумішшю газів; 6) поєднання продування (виштовхування) залишкових газів з відкачуванням.

У напрямку потоку свіжої горючої суміші слід розрізняти її подачу: 1) у напрямку витікання продуктів згоряння; 2) назустріч напрямку витікання продуктів згоряння; 3) уперек напрямку витікання продуктів згоряння; 4) поєднанням зазначених вище способів.

За місцем введення свіжої горючої суміші розрізняють подачу: 1) біля закритого торця; 2) біля відкритого торця; 3) у середній частині стовбура; 4) одночасно по всій довжині стовбура; 5) поєднанням зазначених вище способів.

Газообмін із виштовхуванням залишкових продуктів згоряння продувним газом або компонентом горючої суміші. Продування стовбура інертними газами дозволяє забезпечити повне витіснення залишкових газів, що містять продукти згоряння і частинки порошку, додаткове охолодження стінок стовбура, а при достатній витраті й тривалості подачі та охолодження виробу, що напилюється, виключає перемішування свіжої горючої суміші з продуктами згоряння. Підбором складу продувного газу можна якоюсь мірою управляти характером перемішування свіжої горючої суміші з газом, що витісняється. Належною побудовою циклограми робочого циклу процесу досягається захист за допомогою продувного газу від зворотного удару полум'я. Недоліками цього способу є збільшена витрата газів та ускладнення конструкції ДГУ. Спрощення конструкції досягається при використанні для продування одного або кількох газів-компонентів паливної суміші. Одна із перших схем такого призначення показана на рис. 1 [8]. У ДГУ використаний інжекційний змішувач, змонтований біля закритого торця стовбура 1, що має змішувальну камеру 2, камеру пального газу 3, рухомий інжектор 4 з підведенням газу-окислювача і пов'язаний з приводом зворотно-поступального руху 5. При лівому положенні інжектора струмінь окислювача (повітря, кисню, їх суміші та ін.), що витікає з нього, ежектує горючий газ, які, перемішуючись в камері 2, надходять в робочу порожнину стовбура 1. Горюча суміш, що утворюється, витісняє залишкові гази та заповнює стовбур. Потім привід 5 переміщує інжектор у праве положення, перекриваючи прохід між камерами 2 і 3. Окислювач, продовжуючи безперервно витікати з інжектора, формує газову захисну пробку перед запалювачем 6. Останній ініціює горіння. Після виго-

ряння паливної суміші потік окислювача витісняє зі стовбура продукти згоряння. Після переміщення інжектора у ліве положення процес повторюється. Для надійної роботи цієї схеми ДГУ необхідно забезпечити ретельне сполучення та герметизацію зчленування інжектора зі змішувальною камерою. Розглянута схема газообміну може бути реалізована за допомогою звичайних ДУ, що мають систему механічних клапанів, шляхом відповідної організації робочого циклу процесу ДГН.

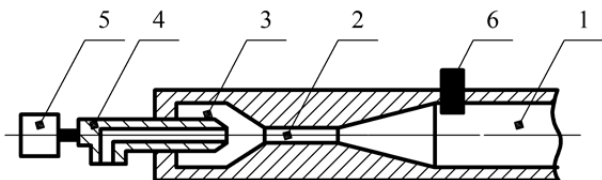


Рис. 1. Основні параметри та види стану границі розділу газотермічного покриття з основним матеріалом виробу

Газообмін із виштовхуванням залишкових продуктів згоряння свіжою горючою сумішшю. Подача свіжої горючої суміші з безпосереднім виштовхуванням нею продуктів згоряння реалізується або при безперервному введенні її в камеру згоряння або при її пульсуючій подачі. У першому випадку умови введення горючої суміші повинні бути узгоджені з умовами проскакування полум'я. Теорія проскакування полум'я дана на роботах [9 – 11]. Для бідних ацетиленокисневих сумішей при використанні горючих газів-замінників ацетилену і паливно-повітряних сумішей можуть застосовуватися, як правило, звичайні інжекційні змішувачі, що використовуються при газополум'яній обробці. Питання безперервного введення горючої суміші в стовбур розглянуті також у роботах [12 – 14]. На основі аналізу процесів, супутніх детонації газів у трубах, запропоновано вводити газову суміш у ствол ДГУ через сопло з використанням принципу інжекторного змішування горючого газу та кисню [14, 15]. При розмірах сопла, що забезпечують закінчення суміші в режимі відриву полум'я, і розташування його перпендикулярно до осі стовбура проникнення детонації в зону інжекції (зворотний удар) відсутнє. Завдяки використанню кисню, як несучого газу, з підсмоктуванням ацетилену низького тиску забезпечується локалізація горіння в зоні інжектора у разі аварійного прориву полум'я через сопло та усунення аварійної ситуації шляхом зриву інжекції шляхом подачі азоту в зону інжекції (об'єм газу, що вводиться, не перевищує 5 % об'єму стовбура). У другому випадку використовують клапани або інші системи, що забезпечують переривання подачі свіжої суміші під час її вигорання та охолодження продуктів згоряння.

Газообмін із відкачуванням залишкових продуктів згоряння. Відкачування залишкових газів зі стовбура є новим недостатньо опрацьованим напрямком у газообміні ДГУ. На рис. 2, а показана одна з можливих конструктивних схем [16]. Середня частина камери згоряння через клапан 2 приєднана до

системи відкачування 3. Біля вихідного кінця камери згоряння встановлена приводна запірна заслінка 4. Біля закритого торця камера з'єднана з системою подачі газів 5. При закритій заслінці 4 проводять відкачування залишкових газів зі стовбура, а потім заповнюють його свіжою горючою сумішшю газів та порошком, відкривають заслінку та ініціюють горіння запалювачем 6. При відкачуванні залишкових газів забезпечується більш однорідне заповнення стовбура горючою сумішшю, виключається натікання гарячих продуктів згоряння з частинками порошку, що залишилися, при газообміні на напилуваний виріб. У багатосекційних стовбурах відкачування можуть піддаватися окремі секції [17].

Комбінований газообмін з відкачуванням та продуванням залишкових продуктів згоряння. Поєднання продування з відкачуванням стовбура досягається при використанні інжекторного принципу відкачування [18], схема якого показана на рис. 2, б, в. Вихідна частина ствола 1 забезпечена кільцевою порожниною, з'єднаною із системою подачі інжектуючого газу і кільцевою щілиною з виходом на бічні стінки ствола (рис. 2, б) або на торцеву поверхню зрізу ствола (рис. 2, в). Інжектуючий газ витікає з кільцевої щілини з великою швидкістю, інжектуює газ зі стовбура, створюючи в ньому розрідження і забезпечуючи таким чином відкачування залишкових газів і швидше їх видалення, і заміну свіжою горючою сумішшю. Недоліком цієї схеми є викид пилових забруднень на підкладку зі збільшеною швидкістю, що може негативно позначитися на якості покриттів, що наносяться. Тому у ряді випадків може бути ефективнішим підключення кільцевої порожнини в наведених вище схемах до системи відкачування, тобто у цьому випадку через кільцеву щілину здійснюватиметься безпосередній відбір залишкових газів. Відкачування може здійснюватися через отвір у стінках стовбура (рис. 2, г) та кільцеву щілину, спрямовану до закритого торця стовбура (рис. 2, д). В останньому випадку вихідна частина стовбура може мати дещо збільшений діаметр. Перевага цієї схеми полягає в усуненні впливу потоку з підкладкою, який витісняється зі стовбура, а при відкачуванні, що діє безперервно, буде частково видалятися хвостова низькошвидкісна частина імпульсного двофазного потоку.

Якщо відкачування стовбура здійснювати в середній частині, як показано на рис. 2, е, забезпечуються стабільні умови роботи з недозаповненням стовбура. Тут 1 – порожнина відкачування, з'єднана зі стовбуром 2 і системою відкачування 3, 4 – система подачі горючої суміші.

Для організації протитечії горючої суміші та порошкової хмаринки при наповненні стовбура можна здійснювати відкачування біля закритого торця, а введення свіжої горючої суміші у вихідного кінця. Подібний варіант зображено на рис. 2, д, де 1 – стовбур, 2 – запірний клапан, 3 – система відкачування, 4 – кільцева камера біля вихідного кінця стовбура, з'єднана з системою подачі газів 5. Ця ж схема може

використовуватися при використанні повітряних сумішей шляхом подачі горючого газу в кільцеву порожнину 4 і перемішування його з повітрям, що інжектується з навколишнього середовища.

На рис. 2, к показана схема ДГУ з введенням 1 свіжої горючої суміші в середню частину стовбура 2 з роздвоєнням потоку у напрямку до закритого кінця з системою відкачування 3 і вихідного торця. Цим можна суттєво скоротити час наповнення стовбура.

Газообмін із поперечним рухом газів. Для підвищення скорострільності ДГУ та покращення газообміну може бути використаний поперечний рух газів. Три можливі варіанти показані на рис. 2. Перший (рис. 2, л) передбачає з'єднання робочої порожнини стовбура 1 з системами відкачування 2 і подачі свіжої суміші 3 через отвори в стінках стовбура.

Другий варіант (рис. 2, м) передбачає наявність у стовбурі протилежно розташованих поздовжніх щілин для введення та видалення газів. Третій варіант (рис. 2, н) передбачає виконання протилежно розташованих стінок 1 камери згоряння 2 пористими (газопроникними), одна з яких відокремлює камеру згоряння від порожнини наповнення 3, друга – від порожнини відкачування або приймання залишкових газів 4. Цим забезпечується можливість не тільки газообміну з поперечним рухом газів, а також організації пористого охолодження шляхом відповідної організації циклу робочого процесу напilenня. Можлива також подача через порожнини 3 та 4 компонентів горючої суміші з наступним змішуванням їх у камері згоряння.

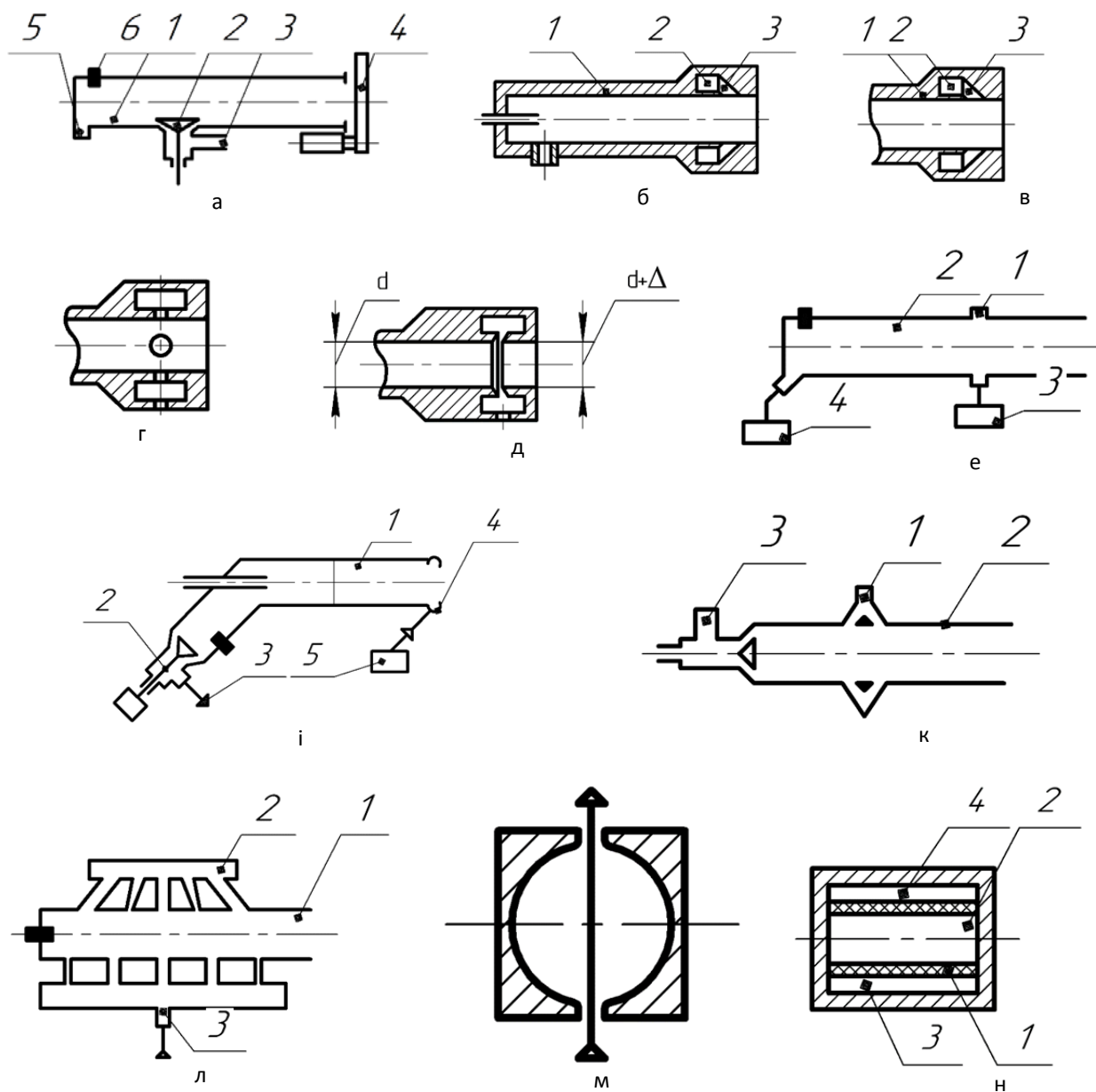


Рис. 2. Схеми газообміну в робочих камерах детонаційно-газових установок

На рис. 3 показана комбінована схема газообміну, коли один із компонентів горючої суміші подається від закритого торця до відкритого кінця стовбура, а інший через пористі стінки в поперечному напрямку.

У багатьох розглянутих схемах можуть бути передбачені різні завихрювачі та турбулізатори, що сприяють покращенню якості газообміну.

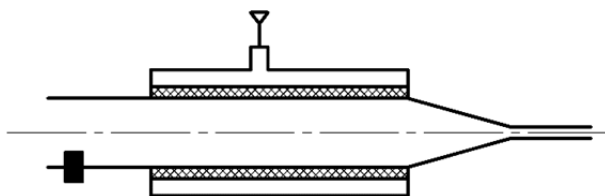


Рис. 3. Схема комбінованого газообміну у стволі ДГУ

Циклічність подачі газів. Класифікацію схем подачі газів до ДКУ за циклічностями було розглянуто раніше [19, 20]. Проте пізніше запропоновані ДГУ з безперервним сумішоутворенням [21 – 23] для багатостовбурних установок, тобто можливі

схеми з циклічною подачею у відвід заздалегідь підготовленої горючої суміші у загальному змішувачі. Інша додаткова схема пов'язана з циклічною подачею тільки горючого газу, а як окислювач використовується повітря, що інjektується безпосередньо з повітряної атмосфери [24, 25]. Третя додаткова схема пов'язана з використанням розроблюваного об'ємного принципу дозування [26 – 29], тобто з попереднім заповненням дозувальних ємностей газами та наступним напуском їх у стовбур.

Основні можливі варіанти циклічності подачі газів схематично показано на рис. 4. Вибір схеми подачі газів визначається в основному складом та характеристиками процесу горіння обраної горючої суміші, а також конструктивними особливостями газорозподільного механізму. Перша схема забезпечує найбільш економічне використання робочих газів, проте вимагає застосування приводних клапанів у газорозподільному механізмі, що знижує надійність ДГУ, ускладнює переналадження циклограми процесу. Тому робляться спроби створення простіших та надійних схем газорозподілу.

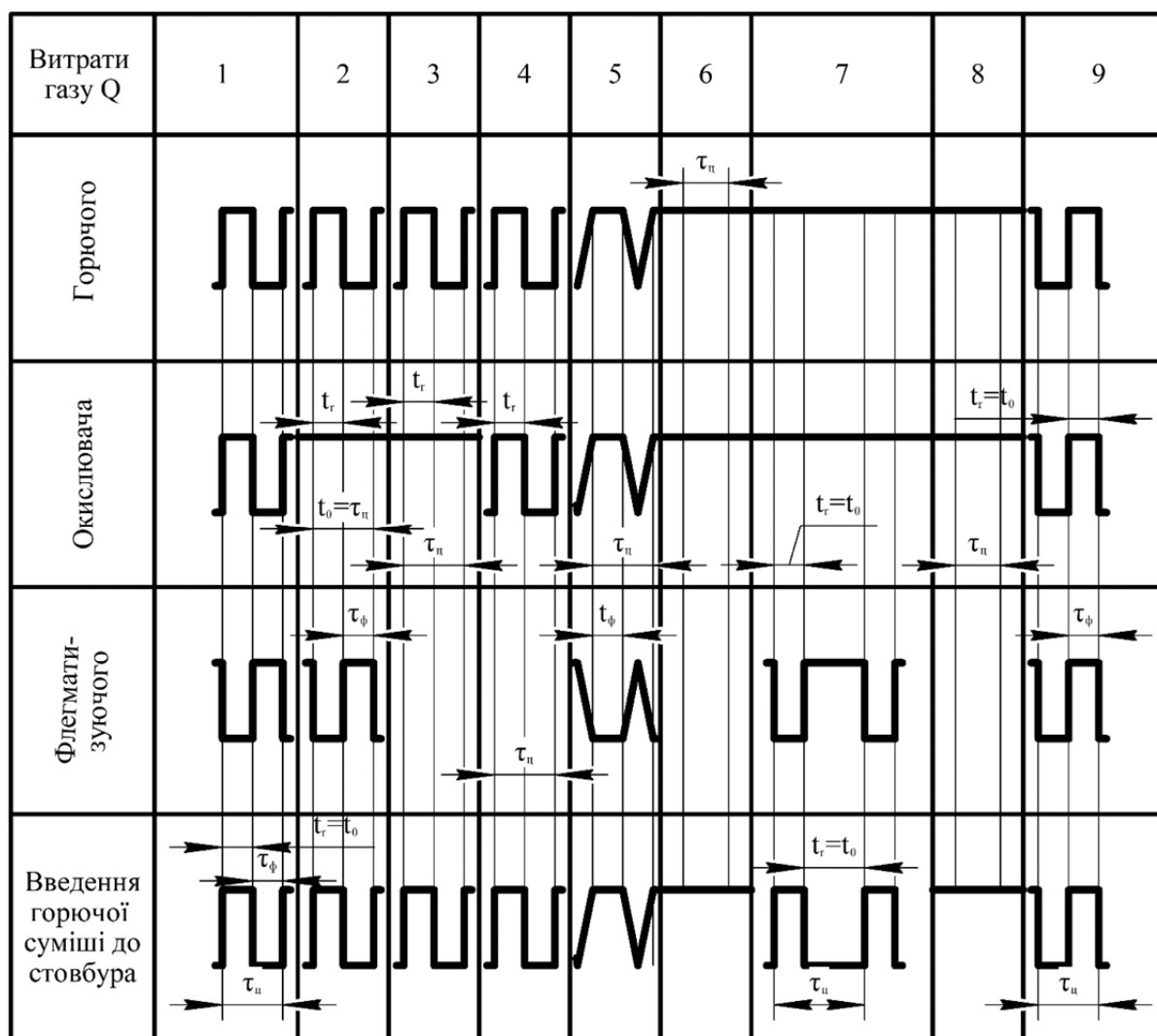


Рис. 4. Варіанти схем подачі в стовбур за циклічності

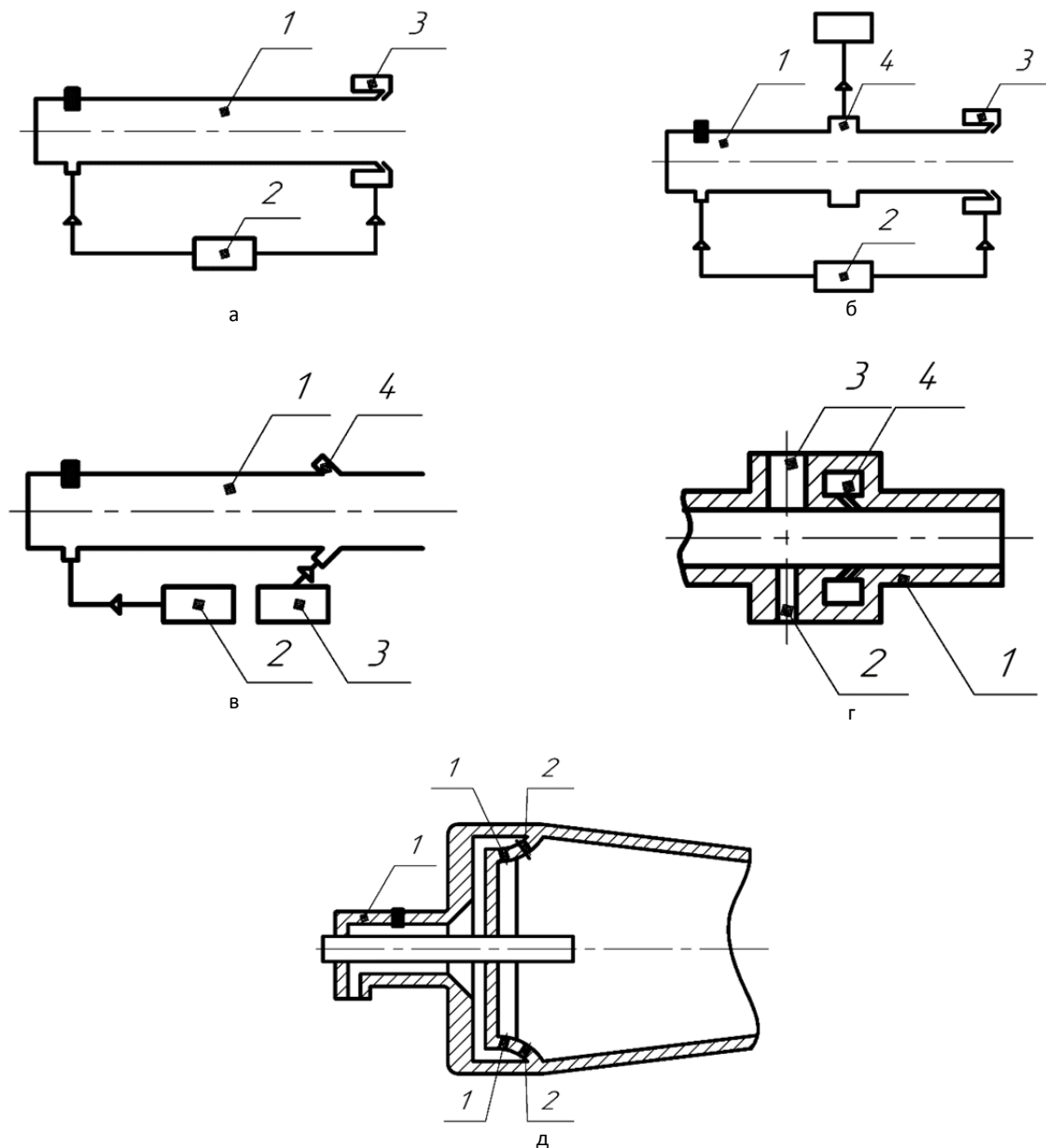


Рис. 5. Схеми наповнення стовбура свіжою горючою сумішшю

Друга схема відрізняється безперервною подачею окислювача (кисню, повітря) та поперемінним введенням горючого та флегматизуючого (азоту або повітря) газів. В одній з конструкцій це реалізовано у простому газорозподільному механізмі, виконаному у вигляді рухомого елемента-штока, торці якого поперемінно перекривають трубопровід подачі азоту та кільцеву щілину подачі ацетилену. Кисень подається у відвід через інжекційний змішувач безперервним потоком, при цьому протягом більшої частини робочого циклу він утворює горючу суміш, а потім спільно з азотом бере участь в утворенні запобіжної «пробки» та продувці стовбура від залишкових газів.

Третя схема характеризується безперервною подачею окислювача та переривчастою подачею горючого газу. Роздільна газова пробка між продуктами згоряння та свіжою горючою сумішшю формується з

окислювача. Найбільш просто це реалізується у конструкції шляхом поєднання функцій інжекційного змішувача з клапаном подачі горючої суміші. Інжектор подачі окислювача виконано рухомим, а його торцева поверхня і конусна частина приймальної камери зсуву – сполучними для періодичного перекриття горючого газу [19].

За четвертою схемою здійснюється циклічна одночасна подача горючого газу та окислювача. Застосування її обмежено низькою скорострільністю і важко займистими горючими сумішшями.

У пристроях з безперервним введенням газів-компонентів горючої суміші потік горючої суміші, що утворюється, може циклічно розсікатися пробкою флегматизуючого газу, що утворюється біля закритого торця і стовбура. Це використовується у 5-й схемі та реалізовано у ДГУ конструкції ІПМ АН УРСР (м. Київ).

При безперервній подачі горючої суміші без застосування інертного газу (6-а схема) ДГУ працює без запобіжної (роздільної) пробки між продуктами згоряння та свіжою горючою сумішшю. Для локалізації згоряння горючої суміші у стовбурі застосовують різні види вогнеперешкоджувачів та полум'ягасників. Для багатьох сумішей достатньо використання інжекційного змішувача, змонтованого на стовбурі у місці введення горючої суміші.

Слід розрізняти також подачу горючої суміші або її компонентів безпосередньо в камеру згоряння стовбура або через проміжні камери та порожнини, створювані для форкамерного запалення, локалізації горіння, поліпшення якості газообміну та ін. Ряд схем подачі горючої суміші в стовбур було розглянуто раніше [19].

Відомо принцип наповнення стовбура свіжою горючою сумішшю зустрічними струменями (рис. 5, а). Камера згоряння 1 стовбура з'єднана з системою подачі горючої суміші у закритого торця і біля вихідного кінця через кільцеву порожнину 3. Цим може бути досягнуто не тільки прискорення наповнення стовбура, а й підвищення вихідного тиску паливної суміші в стовбурі перед згорянням. Більш ефективна реалізація цього способу досягається при відкачуванні залишкових газів у середній частині стовбура. Для цього ДГУ додатково забезпечується системою відкачування 5, з'єднаною з кільцевою порожниною відкачування 4 в середній частині стовбура (рис. 5, б).

Газообмін зі змінним складом свіжої горючої суміші. Для регулювання характеру та інтенсивності взаємодії порошку з продуктами згоряння можна використовувати процес напilenня зі змінним по довжині стовбура складом горючої суміші. Одна з можливих схем цього способу показана на рис. 5, в. Стовбур 1 з'єднаний з системами подачі горючих сумішей 2 і 3, з першою у закритого торця, з другою в середній частині через кільцеву щілину 4, що забезпечує витікання в напрямку вихідного кінця стовбура. Ця ж схема може бути використана для прискорення розвитку детонаційного згоряння сумішей, що важко детонують шляхом введення в початкову ділянку стовбура ацетиленокисневої суміші. При необхідності для реалізації певних режимів напilenня у вихідну частину стовбура можуть вводитися й окремі компоненти горючої суміші або газозавис порошку, що розпилюється.

При змінному контрольованому складі газів по довжині стовбура, щоб уникнути їх перемішування в перехідній зоні та забезпечення різкішого переходу складів застосовують поперечні струмені газу в стовбурі. Одна із можливих схем показана на рис. 5, г [117]. Середня частина стовбура 1 має протилежно розташовані вхідну 2 і вихідну 3 поперечні плоскі щілини з виходом, наприклад, плоского струменя, що утворюється в навколишнє середовище. При заповненні початкової ділянки стовбура горючою сумішшю її надлишки будуть видалятися поперечним струменем у навколишнє середовище. Через кільце-

ву порожнину 4 заповнюється вихідна частина стовбура.

За наявності камери запалення (форкамери) горюча суміш може безпосередньо вводиться в стовбур і камеру запалення, або надходити в стовбур через камеру запалення. Прикладом можуть бути стовбури зі змінним перерізом і для напilenня циліндричними детонаційними хвилями (рис. 5, д).

Висновки

Процеси газообміну відіграють важливу роль у протіканні одиничного робочого циклу пульсуючих процесів детонаційно-газового напilenня. Нагрів та прискорення напильованих частинок порошку визначаються впливом на них детонаційної хвилі та супутнього імпульсного потоку продуктів газової детонації. Своєю чергою параметри останнього залежать від складу та інших параметрів свіжого заряду горючої суміші у стовбурі детонаційно-газової установки.

Представляється доцільною постановка та проведення теоретичних та експериментальних досліджень, спрямованих на вдосконалення процесів газообміну в робочих камерах згоряння детонаційно-газових установок для напilenня покриттів.

Література

1. Pulse detonation propulsion: challenges, current status, and future perspective / G.D. Roy, S.M. Frolov, A.A. Borisov, D.W. Netzer. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30 (2004) pp. 545 – 672.
2. Інноваційні можливості газової детонації / Харламов Ю.О., Полонський Л.Г., Балицька Н.О., Клименко С.А. *Наука та інновації*, 2020, т. 16, № 6. С. 105 – 112.
3. Харламов Ю.А. Детонационно-газовые процессы в промышленности / Ю.А. Харламов, Н.А. Будагьянц; Восточноукр. гос. ун-т. Луганск: Изд-во ВУГУ, 1998. 223 с.
4. Баженова Т.В., Голуб В.В. Использование газовой детонации в управляемом частотном режиме. *Физика горения и взрыва*. 2003. Т. 39, № 4. С. 3 – 21.
5. Шоршоров М.Х., Харламов Ю.А. Физико-химические основы детонационно-газового напilenня покрытий. М.: Наука, 1978. 224 с.
6. Газотермические покрытия из порошковых материалов: Справочник / Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов, С.Л. Сидоренко, Е.Н. Ардатовская. Киев: Наукова думка, 1987. 544 с.
7. Шестерненко В.И. Детонационное нанесение покрытий. *Порошковая металлургия*, 1968, № 1. С. 37 – 46.
8. А.с. 629682 (СССР). Устройство для детонационного напilenня покрытий. Ю.А. Харламов, Ю.И. Писклов, Н.М. Рыбалка, О.И. Малышев.
9. Щелоков Я.М., Телегин Э.М., Подымов В.Н. Пособие по освоению систем релаксационного вибрационного горения. Казань: Изд-во КГУ, 1971. 80 с.
10. Моин Ф.В., Шевчук В.У. Явление заброса пламени при горении предварительно перемешанных газов в проточной системе – ФГВ, 1968, № 2. С. 209 – 214.
11. Левин А.М., Брюханов О.Н. Влияние температуры стенок огневого канала на условия возникновения проскока пламени. *Газовая промышленность*, 1963, № 10.

12. Бартенев С.С., Федько Ю.П., Григоров А.И. Детонационные покрытия в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1982. 215 с.
13. Федько Ю.П. Исследование процесса нанесения и свойств окисных детонационных покрытий. Автореф. диссер. канд. техн. наук. М.: 1980. 20 с.
14. Федько Ю.П., Бартенев С.С., Неделько В.Е. Физические основы конструирования бесклапанных дозаторов детонирующей смеси газов. *Детонационные покрытия*. Калинин, 1980. с. 54 – 63.
15. А.с. 508994 (СССР). Установка для нанесения порошковых материалов детонационным методом. Ю.П. Федько.
16. А.с. 539400 (СССР). Устройство для детонационного нанесения покрытий. Ю.А. Харламов.
17. А.с. 769853 (СССР). Устройство для детонационного напыления покрытий. Ю.А. Харламов.
18. А.с. 980318 (СССР). Устройство для детонационного напыления покрытий. Ю.И. Писклов, Ю.А. Харламов.
19. Детонационно-газовая аппаратура для напыления покрытий / Ю.А. Харламов, М.Х. Шоршоров, Ю.И. Писклов, Б.Л. Рябошапко. М.: ИМЕТ АН СССР, 1980. 65 с.
20. Харламов Ю.А., Писклов Ю.И., Рябошапко Б.Л. Оптимизация конструкции детонационно-газовой установки для нанесения покрытий. *Защитные покрытия на металлах*, вып. 16. Киев: Наукова думка, 1982, с. 62 – 64.
21. А.с. 705734 (СССР). Устройство для детонационного нанесения порошковых материалов Тверь-2. Л.Т. Гордеева, А.М. Зингер, В.И. Смирнов и др.
22. А.с. 690688 (СССР). Устройство для детонационного нанесения порошковых материалов Тверь-3. Л.Т. Гордеева, А.М. Зингер, В.И. Смирнов и др.
23. А.с. 736442 (СССР). Установка для детонационного нанесения покрытий. Ю.А. Харламов.
24. А.с. 736440 (СССР). Устройство для детонационного напыления покрытий. Ю.А. Харламов.
25. А.с. 752894 (СССР). Детонационная установка для напыления покрытий. Ю.А. Харламов.
26. Пути повышения точности автоматического дозирования компонентов детонационно-газовой смеси. А.М. Зингер, Л.Т. Гордеева, В.И. Смирнов и др. *Детонационные покрытия*. Калинин, 1980, с. 42 – 53.
27. А.с. 656252 (СССР). Установка Тверь-1 для детонационного нанесения порошковых материалов. А.М. Зингер, Л.Т. Гордеева, В.И. Смирнов, В.А. Тютяев.
28. А.с. 720859 (СССР). Устройство для детонационного нанесения порошковых материалов/ Л.Т. Гордеева, А.М. Зингер, В.И. Смирнов и др.
29. А.с. 666712 (СССР). Устройство для детонационного нанесения порошковых материалов. Л.Т. Гордеева, А.М. Зингер, В.И. Смирнов, В.А. Тютяев.
30. А.с. 736441 (СССР). Устройство для нанесения покрытий. Ю.А. Харламов.
3. Formirovanie gazotermicheskikh pokrytij pri proizvodstve detalej. S.A. Klimenko, L.G. Polonskij, M.Ju. Harlamov, Ju.A. Harlamov, P.A. Vitjaz', V.S. Ivashko, M.L. Hejfec, S.A. Chizhik; pod obshh. red. Ju.A. Harlamova i M.L. Hejfec; Nac. Akad. nauk Belarusi, Otd. Fiz.-tehn. Nauk, Nac. akad. nauk Ukrainy, In-t sverhtverdyh materialov im. V.N. Bakulja. Minsk: Belaruskaja navuka, 2020. 416 s.
4. Bazhenova T.V., Golub V.V. Yspol'zovanye gazovoj detonacyy v upravljajemom chastotnom rezhyme. *Fyzyka gorenija y vzryva*. 2003. T. 39, № 4. S. 3 – 21.
5. Shorshorov M.H., Harlamov Ju.A. Fyzyko-hymicheskiye osnovy detonacyonno-gazovogo napylenija pokrytij. – M.: Nauka, 1978. – 224 s.
6. Gazotermicheskiye pokrytija yz poroshkovyh materyalov: Spravochnik / Ju.S. Borysov, Ju.A. Harlamov, S.L. Sydorenko, E.N. Ardatovskaja. Kyev: Naukova dumka, 1987. 544 s.
7. Shesternenkov V.Y. Detonacyonnoe nanesenye pokrytij. *Poroshkovaja metallurgija*, 1968, № 1. S. 37 – 46.
8. A.s. 629682 (USSR). Ustrojstvo dlja detonacyonno napylenija pokrytij. Ju.A. Harlamov, Ju.Y. Pysklov, N.M. Rybalka, O.Y. Malyshev.
9. Shhelokov Ja.M., Telegyn E.M., Podymov V.N. Posobyje po osvoeniju system relaksacyonnoho vybracyonnoho gorenija. Kazan': Yzd-vo KGU, 1971. 80 s.
10. Moyn F.V., Shevchuk V.U. Javlenye zabrosa plameni pry gorenny predvartel'no peremeshannyh gazov v protochnoj systeme – FGV, 1968, № 2. S. 209 – 214.
11. Levyn A.M., Brjuhanov O.N. Vlyjanye temperatury stenok ogneвого kanala na uslovja vozniknovenija proskoka plameni. *Gazovaja promyshlennost'*, 1963, № 10.
12. Bartenev S.S., Fed'ko Ju.P., Grygorov A.Y. Detonacyonnye pokrytija v mashynostroenyy. L.: Mashynostroenye, 1982. 215 s.
13. Fed'ko Ju.P. Yssledovanye processa nanesenija y svojstv oksnyh detonacyonnyh pokrytij. Avtoref. dysser. kand. tehn. nauk. M.: 1980. 20 s.
14. Fed'ko Ju.P., Bartenev S.S., Nedel'ko V.E. Fyzycheskiye osnovy konstruyrovanyja besklapannyh dozatorov detonyrujushhej smesy gazov. *Detonacyonnye pokrytija*. Kalynyn, 1980. s. 54 – 63.
15. A.s. 508994 (USSR). Ustanovka dlja nanesenija poroshkovyh materyalov detonacyonnym metodom. Ju.P. Fed'ko.
16. A.s. 539400 (USSR). Ustrojstvo dlja detonacyonno nanesenija pokrytij. Ju.A. Harlamov.
17. A.s. 769853 (USSR). Ustrojstvo dlja detonacyonno napylenija pokrytij. Ju.A. Harlamov.
18. A.s. 980318 (USSR). Ustrojstvo dlja detonacyonno napylenija pokrytij. Ju.Y. Pysklov, Ju.A. Harlamov.
19. Detonacyonno-gazovaja apparatura dlja napylenija pokrytij / Ju.A. Harlamov, M.H. Shorshorov, Ju.Y. Pysklov, B.L. Rjaboshapko. M.: YMET AN USSR, 1980. 65 s.
20. Harlamov Ju.A., Pysklov Ju.Y., Rjaboshapko B.L. Optymizacija konstrukcyj detonacyonno-gazovoj ustanovky dlja nanesenija pokrytij. *Zashhytnye pokrytija na metallah*, vyp. 16. Kyev: Naukova dumka, 1982, s. 62 – 64.
21. A.s. 705734 (USSR). Ustrojstvo dlja detonacyonno nanesenija poroshkovyh materyalov Tver'-2. L.T. Gordeeva, A.M. Zynger, V.Y. Smyrnov y dr.
22. A.s. 690688 (USSR). Ustrojstvo dlja detonacyonno nanesenija poroshkovyh materyalov Tver'-3. L.T. Gordeeva. A.M. Zynger, V.Y. Smyrnov y dr.

References

1. Pulse detonation propulsion: challenges, current status, and future perspective / G.D. Roy, S.M. Frolov, A.A. Borisov, D.W. Netzer. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30 (2004) pp. 545 – 672.
2. Innovacijni mozhyvosti gazovoi' detonacii' / Harlamov Ju.O., Polons'kyj L.G., Balyc'ka N.O., Klymenko S.A. *Nauka ta innovacii'*, 2020, t. 16, № 6. S. 105 – 112.

23. A.s. 736442 (USSR). Ustanovka dlja detonacyonnogo nanesenija pokrytyj. Ju.A. Harlamov.
24. A.s. 736440 (USSR). Ustrojstvo dlja detonacyonnogo napylenija pokrytyj. Ju.A. Harlamov.
25. A.s. 752894 (USSR). Detonacyonnaja ustanovka dlja napylenija pokrytyj. Ju.A. Harlamov.
26. Puty povyshenija tochnosti avtomaticheskogo dozirovaniya komponentov detonacyonno-gazovoj smesy. A.M. Zynger, L.T. Gordeeva, V.Y. Smyrnov y dr. Detonacyonnye pokrytyja. Kalynyn, 1980, s. 42 – 53.
27. A.s. 656252 (USSR). Ustanovka Tver'-1 dlja detonacyonnogo nanesenija poroshkovyh materiyalov. A.M. Zynger, L.T. Gordeeva, V.Y. Smyrnov, V.A. Tjutjaev.
28. A.s. 720859 (USSR). Ustrojstvo dlja detonacyonnogo nanesenija poroshkovyh materiyalov. L.T. Gordeeva, A.M. Zynger, V.Y. Smyrnov y dr.
29. A.s. 666712 (USSR). Ustrojstvo dlja detonacyonnogo nanesenija poroshkovyh materiyalov. L.T. Gordeeva, A.M. Zynger, V.Y. Smyrnov, V.A. Tjutjaev.
30. A.s. 736441 (USSR). Ustrojstvo dlja nanesenija pokrytyj. Ju.A. Harlamov

Kharlamov Y., Mitsyk A., Romanchenko O. Gas exchange in D-gun's devices for coating spraying

The main requirements for detonation gas installations (DGI) for coating deposition are explosion safety and environmental friendliness, stable operation and high productivity, etc. In the technological application of gas detonation, it is necessary to solve the problems of fast and high-quality mixing of mixture components, reliable initiation of detonation, cooling of installations, taking into account the limits detonation, strength and weight of devices, etc. The stages of the DGI operating cycle, including the processes of gas exchange in the detonation combustion chambers, ensuring their filling with a fresh combustible mixture and powder with the previous displacement of residual combustion products, determine the initial state of the fresh charge, which affects the intensity and the nature of the physicochemical transformations occurring in the powder particles, and thus the conditions for the formation of coatings. This article is devoted to the systematization and analysis of the principles of organizing gas exchange in the working combustion chambers of detonation-gas installations for spraying coatings, including the analysis and systematization of the designs of detonation-gas installations for spraying coatings operating with various structures of the working cycle, with the identification of concepts and patterns of gas exchange in working combustion chambers. The main gas exchange schemes include the following: with the ejection of residual combustion products by a purge gas or a combustible mixture component; with the ejection of residual combustion products with a fresh combustible mixture; with pumping out of residual products of combustion; combined gas exchange with pumping and purge of residual combustion products; with transverse movement of gases; with a variable composition of the fresh combustible mixture. According to the method of removing residual gases, one should distinguish between: blowing the barrel with inert gases and subsequent supply (pushing out the inert gas) with a fresh combustible mixture of gases; blowing the barrel with air or oxygen, followed by the supply of a fresh combustible mixture; supply of a fresh combustible mixture with its direct ejection of combustion products; supply of a fresh combustible mixture with its direct ejection of combustion products through an intermediate gas plug of short length; pumping out residual gases from the barrel to create a rarefaction (vacuum) with subsequent filling with a fresh combustible mixture of gases; combination of purging (pushing out) of residual gases with pumping out. In the direction of the flow of a fresh combustible mixture, its supply is distinguished: in the direction of the outflow of combustion products; towards the direction of the outflow of combustion products; across the direction of the outflow of combustion products; a combination of the above methods. According to the place where the fresh combustible mixture is introduced into the barrel, its supply is distinguished: at the closed end; at the open end; in the middle part of the barrel; simultaneously along the entire length of the barrel; a combination of the above methods. Gas exchange schemes with different gas supply cycles are considered.

tion products with a fresh combustible mixture; with pumping out of residual products of combustion; combined gas exchange with pumping and purge of residual combustion products; with transverse movement of gases; with a variable composition of the fresh combustible mixture. According to the method of removing residual gases, one should distinguish between: blowing the barrel with inert gases and subsequent supply (pushing out the inert gas) with a fresh combustible mixture of gases; blowing the barrel with air or oxygen, followed by the supply of a fresh combustible mixture; supply of a fresh combustible mixture with its direct ejection of combustion products; supply of a fresh combustible mixture with its direct ejection of combustion products through an intermediate gas plug of short length; pumping out residual gases from the barrel to create a rarefaction (vacuum) with subsequent filling with a fresh combustible mixture of gases; combination of purging (pushing out) of residual gases with pumping out. In the direction of the flow of a fresh combustible mixture, its supply is distinguished: in the direction of the outflow of combustion products; towards the direction of the outflow of combustion products; across the direction of the outflow of combustion products; a combination of the above methods. According to the place where the fresh combustible mixture is introduced into the barrel, its supply is distinguished: at the closed end; at the open end; in the middle part of the barrel; simultaneously along the entire length of the barrel; a combination of the above methods. Gas exchange schemes with different gas supply cycles are considered.

Key words: gas exchange; combustible mixture; detonation gas spraying (D-Gun spraying); residual products of combustion; coatings; purge gas; mixing gases.

Харламов Юрій Олександрович – д.т.н., проф., професор кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк) yuriy.kharlamov@gmail.com

Міцник Андрій Володимирович – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк) an.mitsyk@gmail.com

Романченко Олексій Володимирович – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк) alexvromanchenko@gmail.com

Стаття подана 27.01.2022 р.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-272-2-91-98>

УДК 621.91

КЛАСИФІКАЦІЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН З ОБЛІКОМ ЯКОСТІ ЇХ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ

Харламов Ю.О., Романченко О.В., Міцик А.В.

CLASSIFICATION OF MACHINE PARTS TAKING INTO ACCOUNT THE QUALITY OF THEIR SURFACE LAYER

Kharlamov Y.O., Romanchenko O.V., Mitsyk A.V.

Скорочення трудомісткості та термінів конструкторської та технологічної підготовки виробництва є актуальним завданням машинобудування. Її розв'язання забезпечується шляхом комплексної автоматизації процесів проектування, а також використанням принципів уніфікації та типізації. Оперативно та обґрунтовано виконувати запозичення проєктних рішень можна лише з використанням систем класифікації, що дозволяють описати об'єкти виробництва знеособленим кодом (незалежно від їхнього функціонального призначення). Розглянуто наявні підходи щодо оцінки ролі поверхонь при класифікації деталей машин в наявних системах автоматизації проектування технологічних процесів. У відомих підходах до технологічної класифікації деталей машин їх поверхні розглядаються з геометричної точки зору та не враховуються параметри якості поверхневого шару, за винятком шорсткості поверхонь. Для високонавантажених відповідальних поверхонь деталей доцільно використовувати інформаційні моделі поверхонь, які можуть бути охарактеризовані та описані відповідною сукупністю (множиною) ознак. Показано необхідність стандартизації технологічно керованих та метрологічно забезпечених параметрів, що мають основний вплив на експлуатаційні властивості деталей машин. Експлуатаційні властивості деталей машин, що визначають їхню надійність, залежать від системи параметрів якості їх робочих поверхонь: макровідхилення; хвилястості; шорсткості; субшорсткості; фізико-хімічних властивостей. Систематизована інформація про характер впливу на експлуатаційні властивості деталей машин та їх з'єднань основних параметрів якості поверхні. Запропоновано методику кодування поверхонь за їх функціональним призначенням або експлуатаційними властивостями двома розрядами, а поверхонь багатофункціонального призначення комплексом таких розрядів. За функціональним призначенням та необхідними експлуатаційними властивостями здійснюється вибір та перевірка призначення конструктивно-технологічних особливостей та параметрів стану поверхневого шару. Розроблено методики кодування типу поверхневого шару (ПШ), матеріалу ПШ за хімічним складом та параметрів якості ПШ.

Ключові слова: класифікація; кодування; параметри якості поверхневого шару; поверхня; типізація; уніфікація; експлуатаційні характеристики.

Вступ. Скорочення трудомісткості та термінів конструкторської та технологічної підготовки виробництва є актуальним завданням машинобудування. Її рішення забезпечується шляхом комплексної автоматизації процесів проектування (CAE/CAD/CAM), а також використання принципів уніфікації та типізації [1, 2]. Однак в наявних системах CAD/CAM недостатньо ефективно застосовують типові проєктні рішення, які дозволяють зберігати й передавати знання у виробничих підрозділах [3]. Оперативно та обґрунтовано виконувати запозичення проєктних рішень можна лише з використанням систем класифікації, що дозволяють описати об'єкти виробництва знеособленим кодом (незалежно від їхнього функціонального призначення). Для цього використовують класифікатор ЄСКД (К.ЄСКД) та технологічний класифікатор деталей машинобудування та приладобудування [4, 5]. Класифікатор ЄСКД охоплює широку номенклатуру деталей машин та приладів, розділену на шість класів. Основними завданнями К.ЄСКД є:

- створення баз даних широкої номенклатури деталей та автоматизований аналіз їх конструкторсько-технологічних ознак;
- групування деталей з конструкторсько-технологічної подібності для розробки типових та групових технологічних процесів з використанням ЕОМ;
- уніфікація та стандартизація деталей та технологічних процесів їх виготовлення;
- підвищення серійності та концентрації виробництва деталей;
- організація предметно-спеціалізованих виробничих підрозділів (дільниць, цехів, заводів);

– вибір раціонального технологічного обладнання та оснащення;

– експертний автоматизований пошук раніше розроблених типових та групових, технологічних процесів;

– автоматизація проектування деталей та технологічних процесів їх виготовлення.

Для впровадження К.ЕСКД у виробництво розробляються автоматизовані експертні системи кодування та класифікації деталей [2, 3].

У технології машинобудування за функціональним призначенням поверхні деталей машин заведено поділяти на чотири види: виконавчі (робочі), що забезпечують виконання деталлю свого службового призначення (передача руху, різання матеріалу, силове навантаження, герметизація та ін.); основні базуючі поверхні або основні бази, що визначають положення деталі щодо інших деталей; допоміжні бази, за допомогою яких визначається положення всіх інших деталей, що приєднуються до цієї деталі; вільні (сполучні), що не сполучаються з поверхнями інших деталей, за допомогою яких виконавчі та базові поверхні деталі об'єднуються у просторове тіло і деталей набуває відповідних конструктивних форм. Розрізняють також поверхні, що сполучаються (поверхні зіткнення і взаємодії двох або декількох деталей у з'єднанні) і вільні поверхні, які з поверхнями інших деталей не взаємодіють.

Аналогічний підхід використовується в модульній технології [6], в якій модулі поверхонь діляться на три класи: базуючі (МПБ), робочі (МПР), сполучні (МПС) та деталь є сукупністю базуючих, робочих та сполучних модулів поверхонь.

Розробляються технологічні класифікатори деталей і поверхонь стосовно різних методів одержання та обробки заготовок, у тому числі та підлягають обробці різанням [7]. Технологічний класифікатор оброблюваної деталі складається з базової та технологічної частин. Базова частина включає опис конструктивних особливостей оброблюваних поверхонь конкретного класу деталей, починаючи від гладкої простої форми та в міру її ускладнення до фасонної, що містить на оброблюваній поверхні різноманітні конструктивні елементи та їх поєднання, що створюють переривчатість у процесі різання. Технологічна частина містить докладні відомості про кількісні та якісні характеристики оброблюваних поверхонь деталі, у тому числі: розмірна характеристика; стан оброблюваної поверхні; ступінь точності; шорсткість; відхилення форми та розташування; матеріал; термічна обробка.

У всіх цих підходах до технологічної класифікації деталей машин їх поверхні розглядаються з геометричної точки зору і не враховуються параметри якості поверхневого шару, крім шорсткості поверхонь. Водночас відомо істотний вплив якості поверхневого шару на експлуатаційні властивості деталей [8, 9].

Метою статті є розробка методики класифікації та кодування інформації про деталі машин, що

враховує особливості стану та параметри якості поверхневих шарів.

Теоретичні основи класифікації деталей. Для розробки інформаційної моделі деталі (ІМД), яка є основною структурною одиницею бази даних про деталі, необхідно визначити основні конструктивно-технологічні характеристики. Деталь D у базі даних може бути охарактеризована і відповідно описана деякою сукупністю (множиною) ознак [3]:

$$D = \{P_1, \dots, P_i, \dots, P_n\},$$

де P_i – i -а ознака деталі; n – загальна кількість ознак деталі.

Кожен з n ознак може бути представлений двома частинами: найменуванням ознаки X_i та її числовим значенням x_i . При кодуванні певної ознаки якогось об'єкта виробництва використовують відповідну йому класифікаційну систему.

У процесі розробки ІМД вирішується завдання обґрунтування раціонального набору класифікаційних ознак, які є найбільш інформативними для конструкторського та технологічного проектування. Це завдання належить до класу завдань, пов'язаних з оцінкою необхідності та достатності деякої сукупності ознак, і вирішена шляхом накладання множини $Y = (y_1, \dots, y_i)$ конструкторських і технологічних параметрів об'єктів виробництва на безліч класифікаційних ознак $X = (x_1, \dots, x_i)$. Накладання множини Y на множину X математично можна представити за допомогою відображення множин [3].

У цьому випадку маємо багатозначне відображення v множини Y параметрів об'єктів виробництва у множину X класифікаційних ознак:

$$v: Y \rightarrow X.$$

Відображення v означає, що кожному елементу y_i множини Y зіставляється один або кілька елементів x_i множини X , які тією чи іншою мірою впливають на y_i .

При цьому образом $v(y_i)$ кожного параметра об'єкта виробництва $y_i \in Y$ за підмножиною X буде підмножина класифікаційних ознак $x_i \in X$, що зіставляються при відображенні v елементу y_i :

$$v(y_i) = \{x_i\} \in X,$$

де $\{x_i\}$ – підмножина класифікаційних ознак, що є найбільш інформативними для y_i .

Наступний крок відображення множин v полягає в об'єднанні образів всіх параметрів об'єкта ви-

робництва $(y_1, \dots, y_i) \in Y$, що дозволяє отримати набір найбільш інформативних класифікаційних ознак:

$$U_{n \in N} v(y_i) = \{x_i / \exists n(n \in N) \wedge x_i \in v(y_i)\},$$

де N – множина образів елементів $(y_1, \dots, y_i) \in Y$ при відображенні v ; n – елементи множини N .

Рациональний склад класифікаційних ознак X_1 (або область значень відображення v) визначимо так:

$$X_1 = \left\{ \left(U_{n \in N} v(y_i) \in X \right) \right\} \subseteq X_{\text{кл.}}$$

Відомі розробки систем класифікації та кодування деталей [3, 7, 10, 11]. У цих системах знеособлене кодове позначення формалізує конструктивно-геометричні характеристики деталей. Конструкторський код деталі визначає геометрію деталі (тіло обертання, корпусні, площинні та ін.), форму та структуру поверхонь (циліндричні, конічні, гладкі, сходові та ін.). Технологічний код визначає такі характеристики, як габаритні розміри, точність, матеріал, заготовка та ін., а в ряді випадків і організаційно-планові характеристики (трудомісткість обробки, річна програма випуску та ін.).

Аналогічний підхід можна використовувати для розробки інформаційної моделі модуля поверхонь (ІММП), яка є основною структурною одиницею бази даних про модулі поверхонь МП, для яких необхідно визначити їх основні конструктивно-технологічні характеристики. Модуль поверхонь МП у базі даних може бути охарактеризований і відповідно описаний деякою сукупністю (множиною) ознак:

$$МП_q = \{P_{мп_1}, \dots, P_{мп_w}, \dots, P_{мп_l}\},$$

де $P_{мп_w}$ – w -а ознака деталі; $q = 1, 2, \dots, l$, l – загальна кількість ознак модуля поверхонь.

Деталь D у базі даних може бути охарактеризована і відповідно описана деякою сукупністю (множиною) модулів поверхонь:

$$\left\{ МПБ_1, \dots, МПБ_\epsilon, \dots, МПБ_t; МПР_1, \dots, МПР_y, \dots, МПР_u; \right. \\ \left. МПС_1, \dots, МПС_p, \dots, МПС_s \right\}.$$

Тут $МПБ_\epsilon$, $МПР_y$, $МПС_p$ – модулі поверхонь деталей, відповідно, базуючи, робочі та сполучні; t , u , s – кількість модулів поверхонь деталі, відповідно, базуючих, робочих і сполучних.

Для високонавантажених відповідальних поверхонь деталей доцільно використовувати інформаційні моделі поверхонь, які можуть бути охарактери-

зовані і описані відповідно деякою сукупністю (множиною) ознак:

$$П = \{P_{п1}, \dots, P_{пj}, \dots, P_{пl}\},$$

де $P_{пj}$ – j -а ознака деталі; l – загальна кількість ознак деталі.

Доцільність класифікації конструктивно-технологічних особливостей та параметрів якості поверхневого шару деталей машин. Всі відмови та руйнування деталей машин відбуваються по одному з експлуатаційних показників (зносо- та корозійної стійкості, міцності та ін.) і починаються, як правило, з поверхні деталей. Всі експлуатаційні властивості та їх показники тісно взаємопов'язані з геометричними та фізико-механічними характеристиками поверхневих шарів [6].

За численними літературними даними [8, 9] експлуатаційні властивості деталей машин, що визначають їхню надійність, залежать від системи параметрів якості їх робочих поверхонь: макровідхилення; хвилястості; шорсткості; субшорсткості; фізико-хімічних властивостей (табл. 1). У найближчому майбутньому очікується стандартизація параметрів, що мають основний вплив на експлуатаційні властивості деталей машин, технологічно керованих та метрологічно забезпечених. У табл. 1 наведено інформацію про характер впливу на експлуатаційні властивості деталей машин та їх з'єднань основних параметрів якості поверхні: H_{max} – максимальне макровідхилення, мкм; H_p – висота згладжування макровідхилення; W_z – середня висота хвиль, мкм; W_p – висота згладжування хвилястості; Sm_w – середній крок хвиль, мм; Ra – середнє арифметичне відхилення профілю, мкм; Rz – висота нерівностей профілю по десяти точках; R_{max} – найбільша висота профілю; R_p – висота згладжування профілю шорсткості, мкм; t_p – відносна опорна довжина профілю, %; Sm – середній крок нерівностей профілю, мм; S – середній крок місцевих виступів профілю, мм; $R_{\text{max}'}$ – найбільша висота профілю субшорсткості; Sm' – середній крок нерівностей профілю субшорсткості; $\pm \sigma_{\text{зал}}$ – залишкові напруження, МПа; $h_{\sigma 0}$ – глибина залягання залишкових напружень, мм; $H_{\mu 0}$ – поверхнева мікротвердість; h_μ – товщина поверхневого шару; ϵ – пружна деформація кристалічної ґрати; l_3 – розмір, форма і розподіл зерен по шару та їх кристалографічна орієнтація; ρ_D – щільність дислокацій.

Численні значення параметрів якості поверхневого шару деталей машин на стадії проектування відповідно до їх функціонального призначення визначають розрахунково-аналітичним, експерименталь-

ним та дослідно-статистичним методами. Дуже важливими факторами є статистичні дані з експлуатації прототипів проєктованих вузлів або машин, а також досвід конструкторів. Вибір параметрів якості робочих поверхонь деталей машин здійснюють у кілька етапів: 1) виявлення умов функціонування деталі (навантаження, швидкість, температура, навколишнє середовище та ін.) та аналіз відповідності їх технічним умовам на виріб; 2) визначення експлуатаційних властивостей деталей машин і їх з'єднань, що лімітують надійність і точність вузлів і машин в цілому, наприклад, допустиме зношування деталей, що сполучаються; 3) пошук відповідних залежностей або табличних даних, що характеризують кількісний взаємозв'язок між даними експлуатаційними влас-

твостями та параметрами якості робочих поверхонь; 4) вибір параметрів якості робочих поверхонь деталей, що забезпечують необхідні значення експлуатаційних властивостей у межах їх зміни.

Виконання цих завдань супроводжується розв'язання різних задач: 1) вибір основного матеріалу, точності розмірів та параметрів стану поверхневого шару (у разі попередньо вибраних конструктивних розмірів деталі); 2) визначення розмірів, їх точності та параметрів стану поверхневого шару (у разі заданого матеріалу деталі); 3) визначення точності розмірів та параметрів стану поверхневого шару (у разі відомих розмірів та матеріалу деталі); 4) визначення параметрів стану поверхневого шару (у разі відомих розмірів, їх точності та матеріалу деталі).

Таблиця 1

Параметри якості поверхневого шару, що визначають експлуатаційні властивості деталей машин та їх з'єднань

Експлуатаційні властивості	$H_{\max}$	H_p	W_z	W_p	Sm_w	Ra, Rz	$R_{\max}$	R_p	t_p	Sm
Контактна жорсткість при навантаженні:										
першому	—	—*	—	—*	—	—	—	—*	—*	—
повторному	—*	—	—*	—	—	—	—	—*	—*	—
Коефіцієнт тертя	+	+	+	+	—	+	+	+	—*	—
Зносостійкість	—	—*	—	—*	+	—	—	—*	—*	—*
Герметичність з'єднань	—	—*	—	—*	—	—	—	—*	—*	—*
Міцність посадок	—	—*	—	—*	—	—	—	—*	—*	—
Міцність деталей	0	0	0	0	0	—	—	—*	—	—*
Втомна міцність	0	0	0	0	0	—	—*	+	—	—*
Корозійна стійкість	0	0	—	—	+	—*	—	—	—*	—*
Поверхнева теплопровідність	—*	—*	—*	—*	—	—*	—	—*	—*	—
Термостійкість	0	0	0	0	0	—	—	—	+	+

Продовження табл. 1

Експлуатаційні властивості	S	$R_{\max}'$	Sm'	$\pm\sigma_{\text{зал.}}$	$h_{\sigma 0}$	$H_{\mu 0}$	h_{μ}	ε	l_z	ρ_D
Контактна жорсткість при навантаженні:										
першому	0	0	0	—*	0	—*	0	—*	—*	—*
повторному	0	0	0	—	0	—	0	—*	—*	—*
Коефіцієнт тертя	—	+	—	—	0	—*	0	+	—	—
Зносостійкість	+	—	+	—*	0	—*	0	—*	—*	—*
Герметичність з'єднань	—	—	—	—	0	—	0	0	0	0
Міцність посадок	0	—	0	—	0	—	0	0	0	0
Міцність деталей	0	0	0	+	—*	—*	—*	+	—*	—*
Втомна міцність	0	0	—*	—*	—*	—*	—*	—*	—*	—*
Корозійна стійкість	—*	—*	—*	—*	+	+	+	—*	—*	—*
Поверхнева теплопровідність	—	—*	—	—	—	—	—	—	+	—
Термостійкість	0	0	0	—	0	—	0	—	—*	—*

Примітка. Позначення «+» і «—» показують, що збільшення та зменшення цих параметрів викликає відповідно поліпшення або погіршення даної експлуатаційної властивості: «*» — параметр надає основний вплив на дану експлуатаційну властивість; «0» — параметр не впливає на цю експлуатаційну властивість.

Вирішення цих завдань часто пов'язане з подоланням низки розбіжностей та обмежень. Так, наприклад, необхідні фізико-механічні властивості поверхневого шару деталі не можуть бути досягнуті при заданому її основному матеріалі, відсутності відповідних марок сталей, відсутності технологічних можливостей досягнення вибраних точності розмірів та параметрів якості поверхневого шару та ін. Для високонавантажених відповідальних деталей і пар часто необхідно проведення оригінальних теоретичних та експериментальних досліджень для визначення впливу різних параметрів якості поверхневого шару на ті чи інші експлуатаційні властивості.

Технологічне забезпечення необхідних параметрів якості поверхневого шару деталей машин досягається можливостями інженерії поверхні та різноманітним механічним та іншими методами розмірної та зміцнювальної обробки. Таким чином, досягнення високої якості машин, і насамперед їх надійності, потребує вирішення складних завдань забезпечення відповідних параметрів якості поверхневих шарів у процесі конструкторської та технологічної підготовки виробництва.

Все більш широко в машинобудуванні використовуються деталі з поверхневим зміцненням. Проте розробка технологічних процесів (ТП) виготовлення таких деталей утруднена обмеженістю відомостей про особливості їхньої обробки. Наявні системи автоматизованого проектування технологічних процесів виготовлення деталей машин не враховують конструктивно-технологічні особливості будови поверхневих шарів та параметри їхньої якості, за винятком окремих параметрів шорсткості. Це потребує відповідного доопрацювання наявних систем проектування ТП, класифікації та кодування деталей.

Класифікація та кодування деталей машин з урахуванням будови та властивостей поверхневого шару. Конструкторсько-технологічна класифікація деталей машин широко використовується при технологічній підготовці виробництва для аналізу та групування номенклатури деталей за конструкторсько-технологічними ознаками з подальшою розробкою типових групових технологічних процесів. На основі конструкторсько-технологічної класифікації кожна деталь описується класифікаційним кодом. Система кодування повинна забезпечувати однозначність присвоєного кожній деталі певного кодового позначення та можливість розширення множини деталей, що підлягають кодуванню без порушення системи кодування.

Відомо багато технологічних класифікаторів деталей машинобудування. Характеристика класів деталей за класифікатором ЄСКД [4] наведено у табл. 2.

Деталі машин відрізняються широким розмаїттям конструктивно та технологічно складних поверхонь, обробка яких потребує тривалої та трудомісткої технологічної підготовки. Особливо це стосується деталей зі сплавів, що важко обробляються, деталей із захисними й функціональними покриттями та

модифікованими поверхневими шарами, обробка яких має специфічні особливості [12 – 14].

Таблиця 2

Характеристика деталей за класами класифікатора ЄСКД

Клас деталей	Характеристика деталей
71	Тіла обертання типу кілець, дисків, шківів, втулок, склянок, кришок, валів, осей, шпинделів та інші
72	Тіла обертання з елементами зубчастого зачеплення та інші
73	Не тіла обертання, корпусні, опорні, місткісні та інші
74	Не тіла обертання, площинні, важільні, вантажні, тягові, вигнуті з листів, смуг, стрічок, аеродинамічні та інші
75	Тіла обертання та (або) не тіла обертання; кулачкові, карданні, арматури, санітарно-технічні, пружини, ручки, ущільнювальні та інші

Технологічні класифікатори оброблюваних деталей зазвичай складаються з базової та технологічної частин. Базова частина включає опис розмірних характеристик деталі, її матеріалу, конструктивних особливостей оброблюваних поверхонь конкретного класу деталей, починаючи від гладкої простої форми та в міру її ускладнення до фасонної, що містить на оброблюваній поверхні різноманітні конструктивні елементи та їх поєднання, які створюють переривчастість у процесі різання та ін. Технологічна частина містить докладні відомості про кількісні та якісні характеристики оброблюваних поверхонь деталі, у тому числі: розмірна характеристика; стан оброблюваної поверхні (заготовки); ступінь точності; шорсткість; відхилення форми та розташування; матеріал; термічна обробка.

Аналіз конструкцій деталей на технологічність повинен включати перевірку відповідності будови та параметрів якості поверхневих шарів їхньому функціональному призначенню. Умови роботи технічних поверхонь дуже різноманітні та розвиток фундаментальних наук про поверхню твердого тіла стимулював розробку поверхневих шарів із різноманітними експлуатаційними властивостями. Кодування поверхні за її функціональним призначенням або експлуатаційними властивостями виконується двома розрядами (табл. 3), а у разі багатофункціонального призначення комплексом таких розрядів. За функціональним призначенням та необхідними експлуатаційними властивостями здійснюють вибір та перевірку призначення конструктивно-технологічних особливостей та параметрів стану поверхневого шару. Для цього необхідне використання та створення відповідних баз даних.

Методи інженерії поверхні дозволяють створювати різні конструкції поверхневих шарів із різних матеріалів. Їхнє кодування виконується однією цифрою за даними табл. 4 та 5.

Таблиця 3

Кодування поверхонь за їх необхідними експлуатаційними властивостями

Код	Необхідна експлуатаційна властивість поверхні
00	Контактна жорсткість
01	Зносостійкість
02	Антифрикційність
03	Фрикційність
04	Герметичність з'єднань
05	Міцність посадок
06	Міцність деталей
07	Втомна міцність
08	Корозійна стійкість
09	Поверхнева теплопровідність (термічний опір)
10	Термостійкість (жаростійкість)
11	Антиадгезійність
12	Термобар'єрні властивості
13	Діелектричні властивості
14	Електропровідність
15	Інтенсифікація теплообміну
16	Ущільнюваність з'єднань
17	Відновлення розмірів та властивостей поверхні
18	Радіаційна стійкість
19	Підвищення адгезійних властивостей сухих поверхонь
20	Антипригарні властивості
21	Самовідновлюваність
22	Супергідрофобність
23	Контрольована змочуваність
24	Зниження гідроопору
25	Протиобростаючі властивості
26	Працездатність в умовах вакууму
27	Сенсорні властивості
28	Оптичні властивості
29	Багатофункціональні властивості
30	Інші властивості та функції

Кожен із параметрів геометрії поверхні та фізико-хімічного стану поверхневого шару кодується однією цифрою за даними табл. 6 та 7.

Таблиця 4

Кодування типу поверхневого шару (ПШ)

Код	Тип поверхневого шару
0	ПШ основного матеріалу у стані попередньої обробки
1	Модифікований ПШ основного матеріалу (ОМ)
2	Дискретно модифікований ПШ ОМ
3	Суцільне одношарове покриття
4	Суцільне покриття з підшаром
5	Суцільне композиційне покриття
6	Суцільне градієнтне покриття
7	Суцільне багатшарове покриття
8	Дискретне покриття
9	Комбінований ПШ (поєднання покриттів із модифікуванням ПШ)

Таблиця 5

Кодування матеріалу поверхневого шару (ПШ) за хімічним складом

Код	Матеріал поверхневого шару (ПШ)
0	Основний матеріал (відповідно до табл.)
1	Покриття з Fe, Ni, Cr, Al, Ti та сплавів на їх основі
2	Покриття із самофлюсованих сплавів систем Ni – Cr – B – Si – C та Fe – Cr – B – Si – C
3	Покриття з Cu, Pb, Cd, Sn, бронзи, бабітів
4	Покриття з Al, Zn
5	Покриття з оксидів Al ₂ O ₃ , ZrO ₂ , TiO ₂ , Cr ₂ O ₃ , SiO ₂ , CaO, Y ₂ O ₃ , MgO, Fe ₂ O ₃
6	Покриття з карбідів вольфраму в суміші з Co, самофлюсуючими сплавами, інтерметалідами Al, Ti, Ni
7	Покриття з карбідів хрому і титану в суміші зі самофлюсуючими сплавами, інтерметалідами Al, Ni, Ti та нікельхромистими сплавами
8	Покриття з тугоплавких металів W, Mo, Nb, Ta в чистому виді та в суміші зі самофлюсуючими сплавами
9	Покриття з керметів на основі сумішей BN – Al – NiCr, Mg – ZrO ₂ – NiCr, MgO – ZrO ₂ з Al та Ni, графіту з Al, Al ₂ O ₃ , Ni, алюмінієм нікелю, ZrO ₂ з алюмінієм нікелю

Таблиця 6

Кодування параметрів геометрії поверхні

Код	$H_{\max}$, мкм	W_z , мкм	Sm_w , мм	Ra , мкм	R_p , мкм	Sm , мм	S , мм
0	400...500	50...60	12...15	25...40	100...125	10...12,5	3,5...5
1	300...400	40...50	9...12	16...25	85...100	8...10	2,75...3,5
2	250...300	30...40	6,5...9	12...16	60...80	6...8	2...2,75
3	200...250	20...30	4,5...6,5	8...12	50...60	4...6	1,25...2
4	150...200	15...20	3...4,5	5...8	40...50	2,5...4	0,75...1,25
5	100...150	10...15	2...3	2,5...5	30...40	1,25...2,5	0,5...0,75
6	50...100	5...10	1,2...2	1,6...2,5	20...30	0,5...1,25	0,25...0,5
7	20...50	3...5	0,4...1,2	0,8...1,6	10...20	0,2...0,5	0,032...0,25
8	10...20	1,5...3	0,2...0,4	0,1...0,8	5...10	0,032...0,2	0,016...0,032
9	3...10	0,08...1,5	0,08...0,2	0,01...0,1	0,032...5	0,0006...0,032	0,002...0,016

Таблиця 7

Кодування параметрів фізико-хімічного стану поверхневого шару

Код	$\pm\sigma_{\text{зал.}}$, МПа	h_{σ} , мм	u_n , %	h_n , мм
0	500...600	1,5...2,0	65...80	2,5...4
1	450...500	1...1,5	55...65	1,5...2,5
2	400...450	0,75...1,0	45...55	1...1,5
3	350...400	0,5...0,75	35...45	0,5...1
4	300...350	0,4...0,5	25...35	0,25...0,5
5	250...300	0,3...0,4	20...25	0,15...0,25
6	200...250	0,2...0,3	15...20	0,05...0,15
7	150...200	0,1...0,2	10...15	0,02...0,05
8	100...150	0,01...0,1	5...10	0,01...0,02
9	60...100	0,005...0,01	0...5	0,005...0,01

Висновки. Використання запропонованих принципів додаткової конструкторсько-технологічної класифікації деталей машин дозволяє: 1) присвоювати кодові позначення типовим поверхням з урахуванням їх функціонального призначення за умовами роботи в процесі експлуатації машини та вибору оптимальних конструктивно-технологічних рішень; 2) виконувати аналіз конструкцій деталей на технологічність щодо забезпечення їх надійності та попередження їх фізичних відмов, що розвиваються у поверхневих шарах; 3) систематизувати досвід створення та застосування поверхнево – зміцнених деталей машин; 4) розподіляти деталі за типами, видами, функціональним призначенням та параметрами якості поверхневих шарів для розробки типових та групових технологічних процесів їх виготовлення; 5) стимулювати розробку та застосування технологій поверхневого зміцнення деталей; 6) удосконалювати систему автоматизованого проєктування технологічних процесів.

Література

- Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 434 с.
- Акулович Л.М., Шелег В.К. Основы автоматизированного проектирования технологических процессов в машиностроении. М.: Новое знание, 2012. 488 с.
- Епифанов В.В., Афанасьев А.Н. Автоматизированная система кодирования и классификации объектов производства. *Автоматизация процессов управления*. № 3 (49). 2017. С. 49 – 55.
- Классификатор ЕСКД. Классы 71, 72, 73, 74, 75. Иллюстрированный определитель деталей. М.: Изд-во стандартов, 1988. 401 с.
- Технологический классификатор деталей машиностроения и приборостроения. М.: Изд-во стандартов, 1988. 256 с.
- Суслов А.Г. Наукоемкие технологии в машиностроении / А.Г. Суслов, Б.М. Базров, В.Ф. Безъязычный и др.; под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2012. 528 с.
- Кудряшов Е.А., Алтухов А.Ю., Луни Д.Ю. Технологический классификатор деталей и поверхностей, подлежащих обработке резанием. *Обработка металлов*. 2009. № 45. С. 3-8.
- Инженерия поверхности деталей / Колл. авт.; под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2008. 320 с.

- Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000. 320 с.
- Конструкторско-технологическая классификация деталей как исходная база технологии их изготовления / Ю.Н. Вивденко, А.А. Ляшков, С.А. Резин, Б.В. Кусик. *Омский научный вестник*. 2007. № 2. С. 106 – 108.
- Ширялкин А.Ф., Угасин А.Н. Разработка методики классификации и кодирования информации о детали для технической подготовки и управления производством в авиастроении. *Вестник Ульяновского государственного технического университета*. 2012. № 2. С. 24 – 31.
- Формирование газотермических покрытий при производстве деталей / С.А. Клименко, Л.Г. Полонский, М.Ю. Харламов, Ю.А. Харламов, П.А. Витязь, В.С. Ивашко, М.Л. Хейфец, С.А. Чижик; под общ. ред. Ю.А. Харламова и М.Л. Хейфеца; Нац. Акад. наук Беларуси, Отд. Физ.-техн. Наук, Нац. акад. наук Украины, Ин-т сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля. Минск: Беларуская навука, 2020. 416 с.
- Харламов Ю.О., Клименко С.А., Будаг'яниц М.А., Полонский Л.Г. Обработка деталей при восстановлении и армировании: Навчальний посібник. Луганськ: Вид-во СХУ ім. В. Даля, 2007. 500 с.
- Кожуро Л.М., Мрочек Ж.А., Хейфец М.Л. и др. Минск: Дизайн ПРО. 1997. 208 с.

References

- Norenkov I.P. Osnovy avtomatizirovannogo projektirovaniya. M.: MG TU im. N. Je Bauman a, 2009. 434 s.
- Akulovich L.M., Sheleg V.K. Osnovy avtomatizirovannogo projektirovaniya tehnologicheskikh processov v mashinostroenii. M.: Novoe znanie, 2012. 488 s.
- Epifanov V.V., Afanas'ev A.N. Avtomatizirovannaja sistema kodirovaniya i klassifikacii ob#ektov proizvodstva. *Avtomatizacija processov upravlenija*. № 3 (49). 2017. S. 49 – 55.
- Klassifikator ESKD. Klassy 71, 72, 73, 74, 75. Illjustrirovannyj opredelitel' detalej. M.: Izd-vo standartov, 1988. 401 s.
- Tehnologicheskij klassifikator detalej mashinostroenija i priborostroenija. M.: Izd-vo standartov, 1988. 256 s.
- Suslov A.G. Naukoemkie tehnologii v mashinostroenii / A.G. Suslov, B.M. Bazrov, V.F. Bez'jazychnyj i dr.; pod red. A.G. Suslova. M.: Mashinostroenie, 2012. 528 s.
- Kudrjashov E.A., Altuhov A.Ju., Lunin D.Ju. Tehnologicheskij klassifikator detalej i poverhnostej, podlezhashih obrabotke rezaniem. *Obrabotka metallov*. 2009. № 45. S. 3-8.
- Inzhenerija poverhnosti detalej / Koll. avt.; pod red. A.G. Suslova. M.: Mashinostroenie, 2008. 320 s.

9. Suslov A.G. Kachestvo poverhnostnogo sloja detalej maschin. M.: Mashinostroenie, 2000. 320 s.
10. Konstruktorsko-tehnologicheskaja klassifikacija detalej kak ishodnaja baza tehnologij ih izgotovlenija / Ju.N. Vivdenko, A.A. Ljashkov, S.A. Rezin, B.V. Kusi. Omskij nauchnyj vestnik. 2007. № 2. S. 106 – 108.
11. Shirjalkin A.F., Ugasin A.N. Razrabotka metodiki klassifikacii i kodirovanija informacii o detali dlja tehnicheckoj podgotovki i upravljenija proizvodstvom v aviiostroenii. Vestnik Ul'janovskogo gosudarstvennogo tehnicheckogo universiteta. 2012. № 2. S. 24 – 31.
12. Formirovanie gazotermicheskikh pokrytij pri proizvodstve detalej / S.A. Klimenko, L.G. Polonskij, M.Ju. Harlamov, Ju.A. Harlamov, P.A. Vitjaz', V.S. Ivashko, M.L. Hejfec, S.A. Chizhik; pod obshh. red. Ju.A. Harlamova i M.L. Hejfec; Nac. Akad. nauk Belarusi, Otd. Fiz.-tehn. Nauk, Nac. akad. nauk Ukrainy, In-t sverhtverdyh materialov im. V.N. Bakulja. Minsk: Belaruskaja navuka, 2020. 416 s.
13. Harlamov Ju.O., Klymenko S.A., Budag'janc M.A., Polons'kyj L.G. Obrobka detalej pry vidnovlenni i zmichen-ni: Navchal'nyj posibnyk. Lugans'k: Vyd-vo SNU im. V. Dalja, 2007. 500 s.
14. Kozhuro L.M., Mrochek Zh.A., Hejfec M.L. i dr. Minsk: Dizajn PRO. 1997. 208 s.

Kharlamov Y., Romanchenko O., Mitsyk A. Classification of machine parts taking into account the quality of their surface layer

Reducing the labor input and terms of product design and manufacturing engineering process planning is an urgent task of mechanical engineering. Its solution is provided by complex automation of design processes, as well as by using the principles of unification and typification. It is possible to quickly and reasonably borrow design solutions only using classification systems that allow describing production objects with an anonymous code (regardless of their functional purpose). Existing approaches to assessing the role of surfaces in the classification of machine parts in existing systems for automation of manufacturing engineering process planning are considered. In the well-known approaches to the technological classification of machine parts, their surfaces are considered from a geometric point of view and the quality parameters of the surface layer are not taken into account, with the exception of surface roughness. For highly loaded critical surfaces

of parts, it is advisable to use information models of surfaces that can be characterized and, accordingly, described by a set (set) of features. The necessity of standardization of technologically controlled and metrologically secured parameters of surface layers, which have a major impact on the performance properties of machine parts, is shown. Operating abilities of machine parts, which determine their reliability, depends on the system of quality parameters of their working surfaces: macro deviations; waviness; roughness; subroughness; physical and chemical properties. Systematized information about the nature of the influence on the operational properties of machine parts and their connections of the main parameters of surface layer quality. A technique is proposed for coding of surfaces according to their functional purpose or operational properties with two digits, and for multifunctional surfaces by a complex of such digits. According to the functional purpose and the required operational properties, the selection and verification of the purpose of design and technological features and state parameters of the surface layer is carried out. Techniques have been developed for coding the type of surface layer (SL), LS material by chemical composition, and SL quality parameters.

Key words: classification; coding; surface layer quality parameters; surface; typing; unification; performance properties.

Харламов Юрій Олександрович – д.т.н., проф., професор кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк)

yuriy.kharlamov@gmail.com

Романченко Олексій Володимирович – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк)

alexvromanchenko@gmail.com

Міцик Андрій Володимирович – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк) an.mitsyk@gmail.com

Стаття подана 27.01.2022 р.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-272-2-99-105>

УДК 535.247.4: 535.243

ФОТОЕМІСІЯ З РІЗНИХ ГРАНІВ МОНОКРИСТАЛІВ АРСЕНІДА ГАЛІЯ**Черніков М.Г., Чернікова І.Д., Чернікова О.М., Рибалко К.Д****PHOTOEMISSION FROM DIFFERENT FACETS OF SINGLE CRYSTALS GALLIUM ARSENIDE****Chernikov M.G., Chernikova I.D., Chernikova O.M., Rybalko K.D.**

Відомо, що іноді розділи науки переживають періоди швидкого розвитку, зумовлені появою якісно нових ідей, аналітичних приладів для отримання експериментальних результатів, а також удосконалення методів вимірів. Яскравий тому приклад – оптична спектроскопія, яка з появою лазерних джерел світла значно змінилася. Поряд з інтенсивним розвитком класичних напрямів у науці виникли нові методи та додатки. Серед нових напрямів особливе місце займає статистичний та спектральний аналіз світлових полів за допомогою фотодетекторів – спектроскопія оптичного усунення. Експериментальні методи спектроскопії оптичного зміцнення, зокрема дослідження статистики фотовідліків, викликали перед експериментаторами певні вимоги до ефективних фотоприймачів. У цій роботі розглядаються методи та способи отримання таких фотоприймачів і залежність роботи таких фотоприймачів від орієнтації граней поверхні монокристалу. Напівпровідникові з'єднання A_3B_5 у перспективі є найперспективнішими для подальшого докладного розгляду. У цьому відношенні арсенід галію є напівпровідниковим з'єднанням, утвореним елементами III і V груп періодичної системи – галієм Ga та миш'яком As. Арсенід галію є найближчим бінарним аналогом германію. Введенням відповідних домішок арсенід галію може бути отриманий з провідністю як *n*-типу, так і *p*-типу з різними концентраціями носіїв струму. Ця структура належить кристалографічного класу кубічної системи. Арсенід галію кристалізується в структурі цинкової обманки. Хімічний зв'язок в арсеніді галію ковалентний з деякою часткою іонності. Внаслідок наявності частки іонності кристали арсеніду галію розколюються лише вздовж площини (110)

Центру симетрії немає. Відсутність центру симетрії призводить до того, що в арсеніді галію у напрямках $\langle 111 \rangle$ з'являються полярні осі. З усього сказаного впливає великий інтерес до вивчення енергетичної структури монокристалу арсеніду галію з різних граней, і цей напівпровідник, як обраний матеріал для дослідження, є одним з перспективних напівпровідникових кристалів у мікро- та нанотехнологіях, оскільки використовується при отриманні холодних катодів, катодів з негативною електронною спорідненістю, інфрачервоних приймачів електромагнітного випромінювання.

Ключові слова: грані монокристала, фотоemisія, квантовий вихід, розподіл фотоелектронів за енергіями, робота виходу, загин зон, електронна спорідненість, напівпровідники

Вступ. Арсенід галію та його поверхневі властивості привертають велику увагу дослідників у зв'язку з можливостями його широкого застосування у техніці мікро- та наноелектроніки.

Незважаючи на численні дослідження поверхні напівпровідників, багато питань щодо її властивостей і процесів на межі двох фаз ще недостатньо з'ясовані, особливо це стосується впливу умов на поверхні на енергетичний спектр електронів у кристалах.

Постановка проблеми у загальному вигляді. Інтерес до цих питань безперервно зростає не лише з наукової точки зору, але й з практичної у зв'язку з розвитком напівпровідникової мікро- та наноелектроніки. Розвиток таких її розділів, як тонкошарова наноелектроніка та оптоелектроніка, пристрої з МДП структурами та зарядовим зв'язком, холодних катодів та ефективних фотокатодів та ін. вимагають розуміння процесів у приповерхневому шарі напівпровідника як при вільній поверхні, так і від орієнтації граней поверхні напівпровідника. Це важливо також для з'ясування можливості бажаним чином змінювати поверхневі та приповерхневі властивості твердих тіл в залежності від кристалографічної орієнтації поверхні.

Оскільки оптичні виміри пов'язані зі своїм власним оптичним поглинанням, яке визначається переходом зона-зона, тобто. збудженням електронів із заповнених валентних зон у зони провідності, всі оптичні переходи підпорядковуються певним правилам відбору [1]. При поглинанні фотона імпульс електрона зберігається, оскільки імпульс фотона h/λ (де λ – довжина світлової хвилі близько тисяч ангстрем $\text{\AA}$) та в досліджуваній області енергій $h\nu$ цей імпульс дуже малий у порівнянні з імпульсом електрона h/a (де a – постійна кристалічна решетка досліджуваного монокристалу, порядку кількох ангстрем $\text{\AA}$).

Коефіцієнт поглинання фотонів з енергією $h\nu$ пропорційний ймовірності P_{if} переходу з початково-

го стану E_i в стан кінцевий E_f і щільності початкових станів N_i і кінцевих станів N_f . При цьому необхідно провести підсумовування всіх можливих переходів між станами, розділеними інтервалом енергії фотона $h\nu$

$$\alpha(h\nu) = A \sum P_{if} N_i N_f \quad (1)$$

За умови, що це переходи із збереженням імпульсу дозволені, тобто ймовірність переходу P_{if} не залежить від енергії $h\nu$ фотона, кожному початковому стану з енергією E_i відповідає кінцевий стан з енергією E_f таке, що

$$E_i + h\nu = E_f \text{ и } k_i = k_f \quad (2)$$

Переходи, що визначаються рівнянням (2), є прямими. Поруч із ними можливі непрямі переходи, коли $k_i \neq k_f$. Вони відбуваються з випромінюванням або поглинанням фонону, так що $k_i + q_p = k_f$ де q_p – хвильовий вектор фонону. І у разі непрямих переходів можливі переходи з будь-якого стану з енергією E_i у будь-який стан з енергією E_f

$$E_f = E_i + h\nu \pm E_p \quad (3)$$

де E_p – енергія фонону.

Непрямі переходи не відіграють помітної ролі у фотоemisійних процесах, зважаючи на їх малу ймовірність переходу порівняно з прямими переходами.

У разі прямих переходів збуджені фотоелектрони під час руху на поверхню можуть втрачати енергію внаслідок різних процесів непорогового розсіювання, що впливає на форму енергетичних розподілів. При вивченні фотоemisії беруться до уваги два процеси розсіювання:

1) електрон-електронне розсіювання (тобто утворення пар електрон-дірка);

2) електрон-фононне розсіювання.

Ці процеси розсіювання дуже різні. У сфері енергії фотонів від 1,4 эВ до 3 эВ енергії збуджених електронів лежать нижче порога електрон-електронного розсіювання, отже, у цій галузі енергій має місце електрон-фононне взаємодія, у якому електрони термалізуються у мінімумі зони провідності. У разі ми можемо отримати інформацію про характер переходів (рис. 1).

При енергіях внутрішніх фотоелектронів значно більшої енергії порога фотоemisії. Основним видом розсіювання є електрон-електронне розсіювання, і, як показано раніше в роботах [2,3], у цьому випадку можна отримати інформацію про міжзонні переходи. Цю інформацію несуть фотоелектрони, які не зазнали розсіювання. Значна частина інших електронів втрачає більшу частину своєї енергії, і в області низьких енергій спектру з'являється безперервне тло.

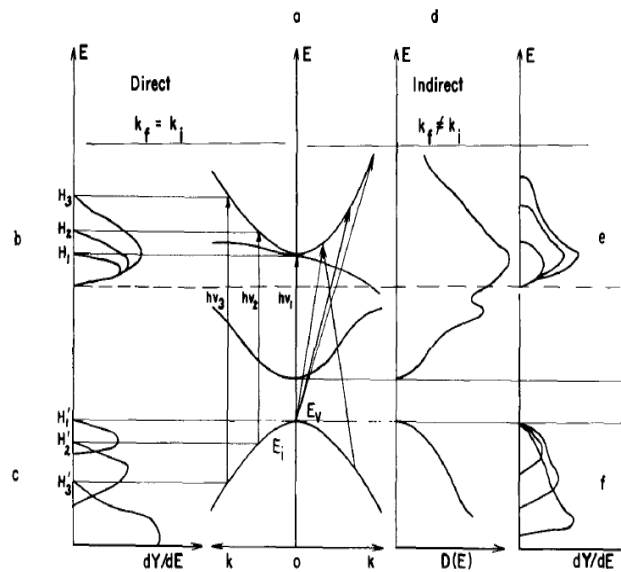


Рис. 1. Прямі та непрямі переходи в твердому тілі: а – схематичне зображення зонної структури $E(k)$ напівпровідника; б – розподіл фотоелектронів у разі прямих переходів; в – розподілу фотоелектронів у разі віднімання з максимальної енергії $h\nu$ енергії фотона $h\nu$, щоб показати початкові стани переходів; д – щільність станів електронів у кристалі; е – енергетичні розподіли фотоелектронів у разі непрямих переходів; ф – переміщені розподіли енергії $(E-h\nu)$ підкреслюють початкові стани, як у (в)

Внаслідок великого коефіцієнта оптичного поглинання фотонів з більшою енергією фотоemisія походить з області поблизу поверхні, де енергетичний спектр може бути змінений впливом поверхні. Для отримання інформації про об'ємні властивості необхідно проводити вимірювання в області енергій фотонів поблизу межі фотоemisії.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Для розуміння процесів, що відбуваються в твердих тілах, необхідно знання їхньої зонної структури. Дослідження структури зон виробляються широкому масштабі як теоретично, і експериментально. Теоретично методи визначення зонної структури засновані на знанні кристалічної структури твердого тіла та властивостей складових його атомів.

Арсенід галію є напівпровідниковою сполукою, утвореною елементами III і V груп періодичної системи – галієм Ga та миш'яком As. AsGa є найближчим бінарним аналогом германію. Введенням відповідних домішок арсенід галію може бути отриманий з провідністю як n-типу, так і p-типу з різними концентраціями носіїв струму. Температура плавлення при стехіометричному складі арсеніду галію 1238 °C. Ширина забороненої зони при кімнатній температурі 1,40 eV і 1,52 eV та при 77 K.

Арсенід галію кристалізується у структурі цинкової обманки. Ця структура належить кристалографічного класу кубічної системи. Центру симетрії немає. Відсутність центру симетрії призводить до того, що у арсеніді галію виникають у напрямі

$\langle 111 \rangle$ полярні осі, тобто напрямки $[111]$ та $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ якісно різні. Відмінність між площинами і добре проявляється при хімічному травленні [4] та в емісійних властивостях [5]. Напрямок від атома галію до атома миш'яку прийнято позначати $[111]$, а протилежне – $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$. На рис. 2 показані моделі основних площин кристалічних ґрат арсеніду галію.

Площина $\{100\}$ утворюється при кубічній упаковці атомів галію Ga та миш'яку As. Кожен атом

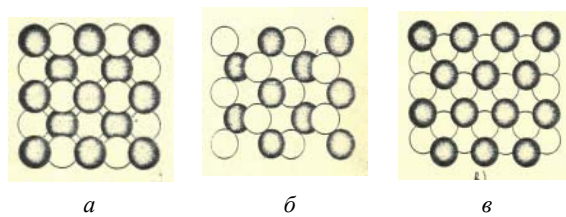


Рис. 2. Моделі трьох основних кристалографічних площин арсеніду галію: а – площину $\{100\}$; б – площину $\{110\}$; в – площину $\{111\}$ (атоми миш'яку – темні кружки)

As має два зв'язки з атомами Ga, що становлять найближчий нижній шар. Два інші зв'язки вільні. У цьому випадку структура не залежить від того, якими атомами – галію Ga або миш'яку As – утворено найвищий шар (рис. 2, а).

Площина $\{110\}$ містить однакову кількість атомів галію та миш'яку. Кожен атом має один зв'язок з наступним шаром шарів атомів. Два зв'язки до двох найближчих сусідів розташовуються у поверхневій площині, а четвертий зв'язок – вільний (рис. 2, б).

Площина $\{111\}$ зображена на рис. 2, в (миш'якова сторона). Три зв'язки поверхневих атомів миш'яку спрямовані до атомів галію, що становлять нижній шар. Четвертий зв'язок вільний [6].

Хімічний зв'язок в арсеніду галію ковалентний з деякою часткою іонності. Внаслідок наявності частки іонності кристали GaAs розколюються тільки вздовж площини (110) , у той час як у ковалентних кристалів (германій Ge, кремній Si) скол можливий уздовж площини (111) . Було показано [7], що при переході від ковалентних кристалів до іонних спостерігається зміна таких властивостей речовини, як стабілізація рівня Фермі на поверхні, відносний внесок непрямих переходів, відносні величини екситонного поглинання.

Стабілізація рівня Фермі на поверхні має речовини з чисто ковалентним зв'язком і відсутня у чисто іонних сполук. Таку стабілізацію на поверхні арсеніду галію спостерігали щодо фотоemisії [8].

Існують різні методи розрахунку зон: ОПВ, ППВ, кр-метод, метод псевдопотенціалу та ін. Ці методи є напівемпіричними. При розрахунках як параметри використовуються відомі з експериментів

величини (такі як ефективна маса електрона, енергія міжзонних переходів та ін.) Розрахунку зонної GaAs присвячений цілий ряд робіт, але найбільш реально відповідає експериментальним результатам робота, виконана Коеном і Бергштрессером [9] з розрахунку зонної структури GaAs методом псевдопотенціалу в напрямках $\{100\}$, $\{110\}$, $\{111\}$ (рис. 3)

Відзначимо деякі особливості зонної структури GaAs. Максимум валентної зони знаходиться у центрі зони Бріллюена. Є одна зона важких дірок і одна зона легких дірок, що замикаються в центрі зони Бріллюена, і ще одна зона, відокремлена від них, через спин-орбітальну взаємодію. Зони важких і легких дірок анізотропні, хоча анізотропія останньої слабка: спин-орбітально відщеплена зона ізотропна. Край валентної зони злегка зрушений від центру симетрії у напрямку $\{111\}$. Найнижчий рівень зони провідності розташований у центрі зони Бріллюена. Наступні мінімуми зони розташовані в напрямках $\{100\}$, $\{111\}$ і на краю зони Бріллюена.

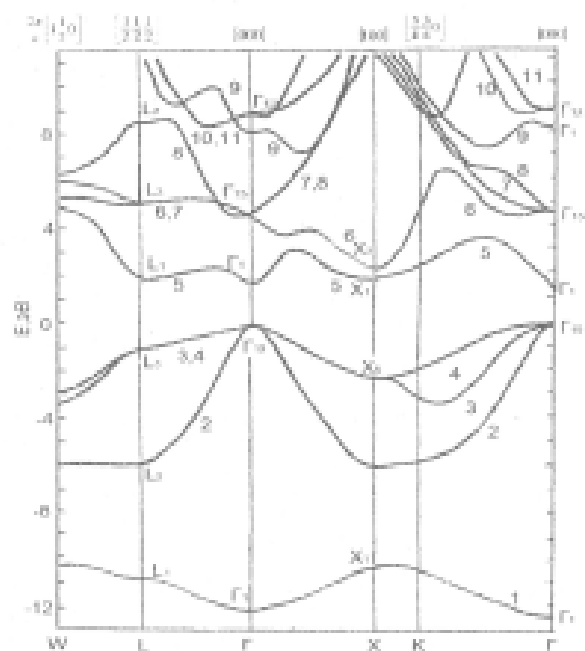


Рис. 3. Зонна структура арсеніду галію

Зі сказаного випливає, що інформація, що отримується про зонну структуру з експериментальних даних (спектри оптичного відображення та поглинання, фотоemisія та ін) має велике значення. Бо дозволяє перевірити результати теоретичних розрахунків.

Мета роботи: Застосуємо метод фотоemisії для дослідження: 1) спектрального розподілу квантового виходу фотоemisії $Y(h\nu)$; 2) енергетичного розподілу фотоелектронів $N(E)$, для аналізу експериментальних результатів для монокристалів GaAs р-типу з різних граней емітуючих поверхонь зразків і порівняти з теоретичними даними розрахованої зонної

структурі GaAs в роботі, виконаною Коеном і Бергштрессером.

Постановка задачі: Дослідження проводилися у високовакуумному комплексному нанометричному спектрометрі [10] з поверхні монокристалу GaAs р-типу кристалографічної орієнтації емітуючої площини з гранями (100), (110), (111) і $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$, фізичні

параметри якого наступні: концентрація носіїв струму $8,18 \cdot 10^{17}$ (см⁻³), $3 \cdot 10^{10}$ (см²/В·с) та питомий опір $2,68 \cdot 10^{-3}$ (Ом·см). Зразки з різними гранями вирізали з одного монокристалу. Орієнтація площин контролювалася рентгеноструктурним методом, і відхилення від зазначеного напрямку не перевищували $\pm 3^\circ$. У кожного із трьох досліджених зразків протилежні площини шліфувалися та хімічно полірувалися. Це дозволило вивчати фотоемісію в одному напрямку із двох протилежних площин. Оскільки всі дослідження були проведені в однакових умовах та в одному приладі [10] за однакових вакуумних умов ($p = 1 \cdot 10^{-9}$ Торр), отримані результати для всіх зразків можна було порівняти між собою. Вимірювання проведено абсолютно за однакових умов для всіх зразків.

Результати дослідження: Спектральні розподіли квантового виходу для трьох зразків представлені на рис. 4. Квантовий вихід фотоемісії Y (електрон/квант) при енергіях фотонів $h\nu = 5.38$ еВ з граней (110), (111) і $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ однаковий $Y = 9,1 \cdot 10^{-5}$ електрон/квант, з грані (100) він менший і величина його $Y = 8,5 \cdot 10^{-5}$ електрон/квант. Поблизу порога фотоемісії квантовий вихід із граней (100) і (110) збігався, тоді як із грані $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ він максимальний, а з грані (111) він мінімальний. Відмінностей суттєвих у квантовому виході при вимірюванні фотоемісії з протилежних сторін площин у напрямках і не виявлено.

Для визначення порогів фотоемісії використовувалася екстраполяція кубічної залежності квантового виходу енергії фотонів (рис. 5). Як впливає з малюнка 5, найменша величина порогу спостерігалася для фотоемісії з грані (111), найбільша – з грані $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$. Значення порогів фотоемісії $h\nu_0$ наведено у таблиці 1

Величина порога фотоемісії $h\nu_0$, яка отримана екстраполяцією лінійної залежності $Y(h\nu)$ від енергії фотонів, однакова для всіх граней і дорівнює 4,74 еВ. У таблиці 1 представлені обчислені значення ϕ , ϕ_0 , $(E_F - E_0)_s$, χ , для різних граней зразків монокристалу AsGa р-типу провідності.

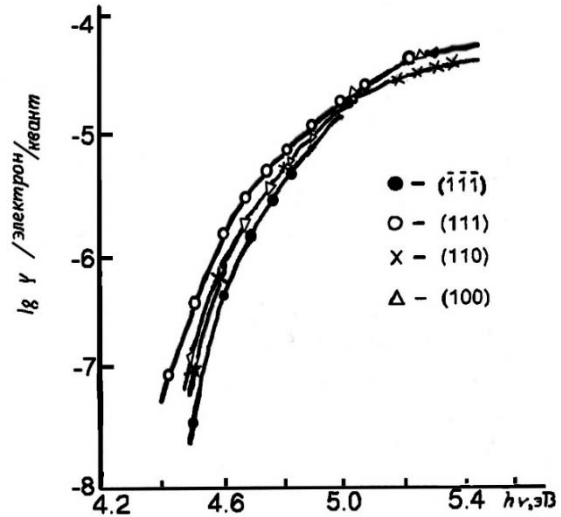


Рис. 4. Спектральний розподіл квантового виходу з граней GaAs p-типу

Як видно з отриманих результатів, значення термоелектронної роботи ϕ (стовпець 4) було найбільшим у зразка з орієнтацією емітуючої площини з гранню $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$, найменше значення спостерігається на грані (111). Розмір різниці термоелектронної роботи виходу $\phi(111) - \phi(\bar{1}\bar{1}\bar{1}) = 0,08$ еВ. Значення термоелектронної роботи виходу з граней мало відрізнялися від термоелектронної роботи виходу з грані (111).

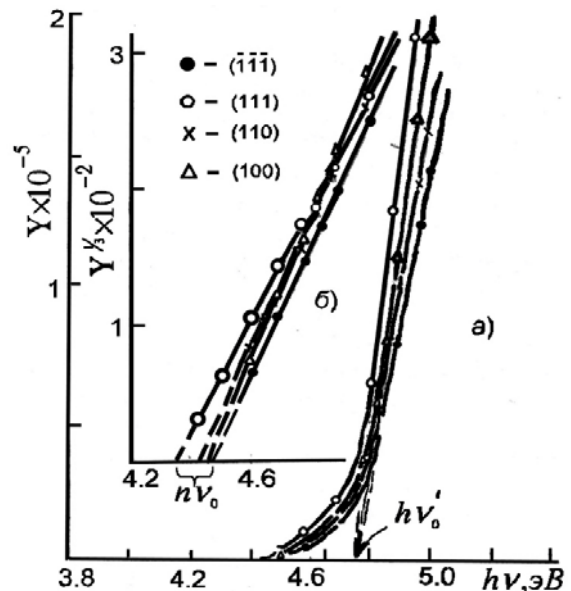


Рис. 5. Спектральний розподіл квантового виходу фотоемісії з різних граней GaAs p-типу: а – лінійні залежність; б – кубічна залежність

Таблиця 1

1	2	3	4	5	6	7	8
орієнтація	$h\nu_0$, eB	$h\nu_0^*$, eB	φ_T , eB	$(E_F - E_0)_B$, eB	$(E_F - E_0)_S$, eB	χ , eB	φ_0 , eB
$(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$	4,46	4,74	4,35	-0,03	0,11	3,06	-0,14
(111)	4,32	4,74	4,23	-0,03	87,08	2,92	-0,11
(110)	4,42	4,74	4,31	-0,03	0,11	3,02	-0,14
(100)	4,44	4,74	4,33	-0,03	0,11	3,04	-0,14

Таблиця 2

Орієнтація поверхні образців	$h\nu = 4,99$ eB			$h\nu = 4,89$ eB			$h\nu = 4,68$ eB		
	V_0 , eB	V_K , eB	φ_Φ , eB	V_0 , eB	V_K , eB	φ_Φ , eB	V_0 , eB	V_K , eB	φ_Φ , eB
$(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$	0,48	0,08	4,43	0,40	0,08	4,41	0,24	0,08	4,36
(111)	0,48	0,20	4,31	0,40	0,20	4,29	0,24	0,20	4,24
(110)	0,46	0,12	4,41	0,38	0,12	4,39	0,24	0,12	4,32
(100)	0,46	0,10	4,42	0,39	0,10	4,40	0,24	0,10	4,34

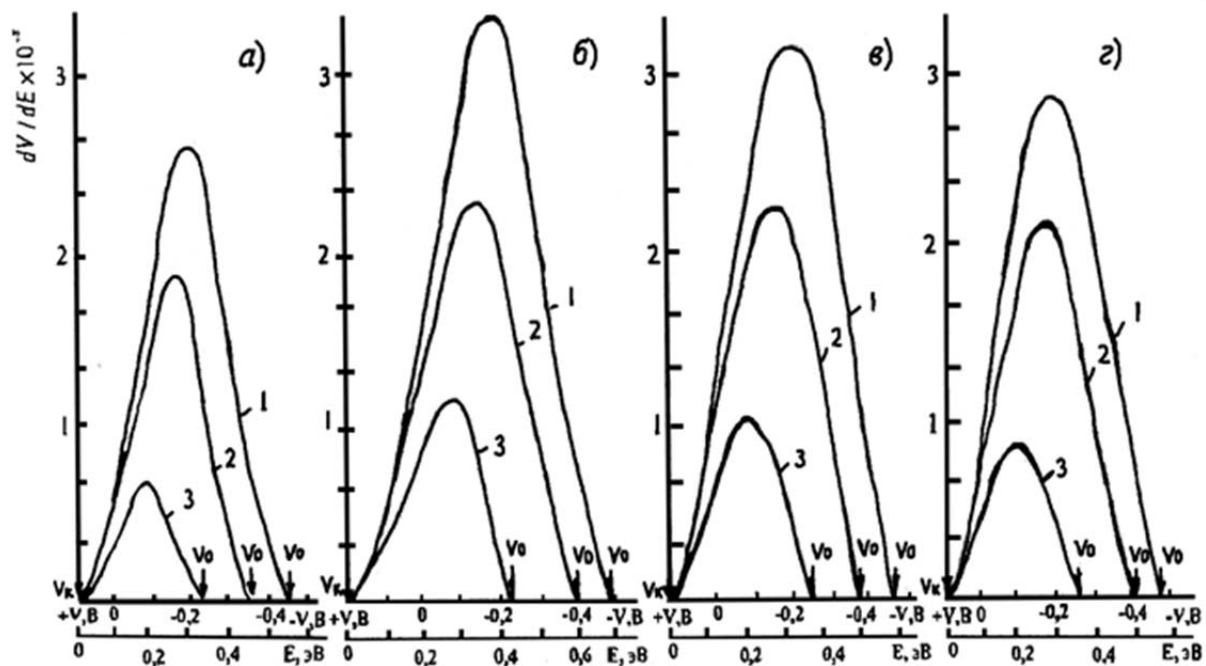


Рис. 6. Розподіл фотоелектронів за енергіями для зразків GaAs р-типу з граней:

$a - (\bar{1}\bar{1}\bar{1})$; $б - (111)$; $в - (110)$; $г - (100)$. Криві 1 – $h\nu = 4,99$ eB; 2 – $h\nu = 4,89$ eB; 3 – $h\nu = 4,68$ eB

У роботі [11] методом вимірювання контактної різниці потенціалів для AsGa було виявлено (після очищення поверхні іонами аргону і при $t = 500$), що величина термоелектронної роботи виходу з грані більша за цю величину з грані і ця різниця становила $\Delta\varphi = 0,7$ eB. Для реальних поверхонь (поверхень отриманих хімічним травленням) ця різниця

склала $\Delta\varphi = 0,1$ eB, що досить збігається з результатами нашої роботи ($\Delta\varphi = 0,08$ eB).

Величина термоелектронної роботи виходу φ_T залежить як від об'ємних, так і від поверхневих властивостей напівпровідника. Поверхні арсеніду галію (111) і $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ в GaAs якісно по-різному. Для грані

поверхні (111) знаходяться атоми галію Ga, тоді як у протилежній поверхні грані знаходяться атоми мишка As. Цим і обумовлені відмінності в термоелектронній роботі виходу.

При вивченні фотоemisії з різних граней спостерігається відмінність у положенні рівня Фермі лежить на поверхні. Як впливає з таблиці 1 (стовпець 6), знайдене положення рівня Фермі на поверхні для граней (110) і ($\bar{1}\bar{1}\bar{1}$) однаково і відрізняються від положення рівня Фермі на поверхні для грані (111). Зіставлення положення рівня Фермі на поверхні з розрахунком його положення в обсязі показує, що величина загибу зон ϕ_0 (стовпець 8) для граней ($\bar{1}\bar{1}\bar{1}$), (110) і (100) однакова і також відрізнялася від загибу зон для грані (111). Загин зон для цієї грані становив 0,11 eV.

Електронне спорідненість χ (стовпець 7) для грані (111) було також найменшим і відрізнялося від значень інших граней на величину 0,1 eV.

Енергетичний розподіл фотоелектронів для різних граней зразків арсеніду галію р-типу провідності (рис. 6) показує, що є один максимум, становище якого відповідає енергії 4,6 eV і збігається зі значенням енергії прямого переходу, зазначеного в роботі [12].

Відмінності, що спостерігаються в розподілах для різних граней полягають у тому, що ширина розподілів $e(V_k - V_0)$ різна. Це зумовлено в основному тим, що для різних граней контактна різниця потенціалів V_k не однакова, в той час як затримуючий потенціал V практично не змінювався для поверхонь всіх граней монокристалу арсеніду галію. Результати експериментальних даних з вимірювань V_0 , V_k і ϕ_0 наведено в таблиці 2, з якої випливає, що найменша фотоелектронна робота виходу ϕ_0 виявилася для грані (111).

Мінімальна величина загибу зон ($\phi_0 = -0,11$ eV), і навіть електронного спорідненості ($\chi = 2,92$ eV) для цієї грані збільшує ймовірність проходження емітуючих електронів через потенційний бар'єр. Тому інтенсивність піків, що спостерігаються в енергетичних розподілах фотоелектронів (рис. 5 б) для грані максимальна. Для грані ж інтенсивність піків – мінімальна (рис. 5, а).

Висновки: Наведені результати дослідження фотоemisії із зразків GaAs р-типу провідності показали, що термоелектронна робота виходу фт і поріг фотоemisії $h\nu_0$ залежить від орієнтації емітуючих граней монокристалів арсеніду галію і мінімальні значення цих енергетичних величин отримані для грані, а максимальні значення отримані значення прямих міжзонних переходів у монокристалах добре збігаються з результатами, отриманими за теоретичних розрахунків зонної структури арсеніду галію в роботі [12].

Література

1. Борбавт А.М., Горбань І.С., Охрименко Б.А. и др. Оптические измерения. К.: Техніка. 1997, с. 419.
2. Eden R.C., Mool J.L., Spicer W.E. Photoemission from GaAs of p-type at adsorption cesium and oxygen. *Phys. Rev. Lett.* 1967, 18, p. 597 – 604
3. Кулышев А.М., Черникова И.Д., Черников Н.Г. Влияние состояния поверхности полупроводников на работу фотодетекторов. *Вісник СХУ ім. В. Даля*, 2016. №2(226). С. 112 – 123.
4. White J.G., Roth W.C. Regularities of chemical etching of the GaAs surface. *J. Appl. Phys.*, 30. 1959, p. 946 – 948.
5. Chernicov N.G., Arsenjeva-Geil A.N. Effect of Conditions at the Surface on the size of the Surface spacecharge layer in Gallium Arsenide. *Sov. Phys. Solid State*, 1975. p. 2091 – 2094.
6. Кесаманлы Ф.П., Наследов Д.Н. Арсенид галлия. Наука. 12973, с. 289.
7. Музер Ф., Пирсон В.Б. Полупроводниковые pseudopotential вещества (вопросы химической связи). Иностранная литература. М.: 1960, с. 425
8. Черников Н.Г., Арсеньева-Гейль А.Н. Влияние условий на поверхности на величину приповерхностного объемного заряда в арсениде галлия. *Физика твердого тела*, том 16, выпуск 11. 1974, с.3388 – 3390.
9. Bergstresser T.K., Cohen M.L. Calculation of area structure of GaAs by the method of. *Phys.Rev.* 1966, 141, p. 789 – 798.
10. Кулышев А.М., Черникова И.Д., Черников Н.Г. Нанометрический корпускулярный фотоэлектронный спектрометр. *Вісник СХУ ім. В. Даля*. 2015, №5(222). С. 40 – 45
11. Mac Rae A.U., Bull C.W. Determining thermionic work function of the p-type single crystal GaAs by Kelvin. *Amer. Phys. Sec.*, 2005, 10, p. 168 – 173.
12. Люзе Л.Л., Духанина Р.Я. Работа выхода граней А и В поверхности (111) арсенида галлия. *Физика твердого тела*, том 41, выпуск 7. 2000. С. 2096 – 2101.

References

1. Borbavt A.M., Gorban' I.S., Okhrimenko B.A. i dr. Opticheskiye izmereniya. K.: Tekhnika. 1997, s. 419.
2. Eden R.C., Mool J.L., Spicer W.E. Photoemission from GaAs of p-type at adsorption cesium and oxygen. *Phys. Rev. Lett.* 1967, 18, p. 597 – 604
3. Kulyshev A.M., Chernikova I.D., Chernikov N.G. Vliyaniye sostoyaniya poverkhnosti poluprovodnikov na rabotu fotodetektorov. *Visnik SNU ім. V. Dallya*, 2016. №2(226). S. 112 – 123.
4. White J.G., Roth W.C. Regularities of chemical etching of the GaAs surface. *J. Appl. Phys.*, 1959, 30. p. 946 – 948.
5. Chernicov N.G., Arsenjeva-Geil A.N. Effect of Conditions at the Surface on the size of the Surface space – charge layer in Gallium Arsenide. *Sov. Phys. Solid State*, 1975. p. 2091 – 2094.
6. Kesamanly F.P., Nasledov D.N. Arsenid galliya. Nauka. 12973, s. 289.
7. Muzer F., Pirson V.B. Poluprovodnikovyye pseudopotential veshchestva (voprosy khimicheskoy svyazi). Inostrannaya literatura. M.: 1960, s. 425
8. Chernikov N.G., Arsen'yeva-Geyl' A.N. Vliyaniye usloviy na poverkhnosti na velichinu pripoverkhnostnogo ob'yemnogo zaryada v arsenide galliya. *Fizika tverdogo tela*, tom 16, vypusk 11. 1974, s.3388 – 3390.

9. Bergstresser T.K., Cohen M.L. Calculation of area structure of GaAs by the method of. Phys.Rev. 1966, 141, p. 789 – 798.
10. Kulyshch A.M., Chernikova I.D., Chernikov N.G. Nano-metricheskiy korpuskulyarnyy fotozhlektroonnyy spektrometr. Visnik SNU im. V. Dala. 2015, №5(222). S. 40 – 45
11. Mac Rae A.U., Bull C.W. Veting thermionic work function of the p-type single crystal GaAs by Kelvin. Amer. Phys. Sec., 2005, 10. p. 168 – 173.
12. Lyuz L.L., Dukhanina R.YA. Rabota vykhoda graney A i V poverkhnosti arsenida galliya. Fizika tverdogo tela, tom 41, vypusk 7. 2000. S. 2096 – 2101.

Chernikov M.G., Chernikova I.D., Chernikova O.M., Rybalko K.D. Photoemission from different facets of single crystals gallium arsenide.

It is known that sometimes branches of science experience periods of rapid development due to the emergence of qualitatively new ideas, analytical instruments for obtaining experimental results, as well as improvements in measurement methods. A vivid example of this is optical spectroscopy, which has changed significantly with the advent of laser light sources. Along with the intensive development of classical trends in science, new methods and applications arose. Among the new directions, a special place is occupied by the statistical and spectral analysis of light fields with the help of photodetectors - optical displacement spectroscopy. Experimental methods of optical displacement spectroscopy, in particular, studies of the statistics of photocounts, caused certain requirements for experimenters to efficient photodetectors. In this paper, methods and methods for obtaining such photodetectors and the dependence of the operation of such photodetectors on the orientation of the faces of the surface of a single crystal are considered. A_3B_5 semiconductor compounds in the future are the most promising for further detailed consideration. In this regard, gallium arsenide is a semiconductor compound formed by elements of groups III and V of the periodic system - gallium Ga and arsenic As. Gallium arsenide is the closest binary analog of germanium. By introducing appropriate impurities, gallium arsenide can be obtained with both

n-type and p-type conductivity with different current carrier concentrations. This structure belongs to the crystallographic class of the cubic system. Gallium arsenide crystallizes in the zinc blende structure. The chemical bond in gallium arsenide is covalent with some degree of ionicity. Due to the presence of an ionicity fraction, gallium arsenide crystals split only along the plane (110). The center of symmetry is missing. The absence of a center of symmetry leads $\langle 111 \rangle$ to the fact that polar axes appear in the directions in gallium arsenide. From all of the above, there is a great interest in studying the energy structure of a single crystal of gallium arsenide from different faces, and this semiconductor, as the material chosen for research, is one of the promising semiconductor crystals in micro- and nanoelectronics, as it is used in the production of cold cathodes, cathodes with a negative electronic affinity, infrared receivers of electromagnetic radiation.

Key words: single-crystal facets, photoemission, quantum excitation, photoelectronics substitution for energy, output robot, zone dip, electronic sporidness, conductors

Черніков Микола Григорійович – к.фіз.-мат.н., доц., доцент, кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк), chernikov_n_g@ukr.net

Чернікова Ірина Дем'янівна – старший викладач . кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк), chernikova_i_d@ukr.net

Чернікова Олена Миколаївна – бакалавр, студент групи ПМЕ-20д, факультет інженерії, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк) chernikovahm@gmail.com

Рибалко Кирило Дмитрович – бакалавр, група ПМЕ-19д, факультет інженерії, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк), raimisterio77@gmail.com

Стаття подана 29.01.2022 р

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-272-2-106-109>

УДК 66.094

РОЗРОБКА ТА ВИКОРИСТАННЯ ПЕРЕМІШУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ ЕЖЕКЦІЙНОГО ТИПУ

Шабрацький С.В., Шабрацький В.І., Тараненко Г.В.

DEVELOPMENT AND USE OF EJECTION TYPE MIXING DEVICES

Shabratsky S.V., Shabratsky V.I., Taranenko G.V.

Наведені результати дослідження роботи технологічної схеми сульфурвання алкилбензолів газоподібним сірчанам ангідридом. На підставі аналізу роботи установки та опрацьованих літературних даних розроблені сульфуратори об'ємного типу для отримання сульфонолу НП-3. Отримані результати експериментальних досліджень, дозволяють змодельовати промислову установку для газорідинних процесів, зокрема для процесу сульфурвання. Зроблена спроба довести, що використання апаратів з барботерами, для вводу газового реагенту для екзотермічної реакції сульфурвання в системі газ-рідина є ресурсно-витратним та громіздким в апаратурному оформленні. Наведені результати дослідження гідродинаміки нових ефективних конструкцій пристроїв, які знайшли широке застосування при апаратурному оформленні періодичних та безперервних процесів змішування в рідких середовищах.

Синтез нових речовин потребує постійного удосконалення, розробки та впровадження нових технологій і апаратурного оформлення для проведення фізико-хімічних перетворень в гетерогенних системах типу газ-рідина. Для проведення таких процесів найбільшого розповсюдження в хімічній і нафтохімічній та фармацевтичній промисловості отримали об'ємні апарати з перемішувачами. Ці процеси розрізняються в залежності від фізико-хімічних властивостей речовин, складу взаємодіючих фаз, швидкістю реакції та інтенсивністю тепловиділення. Серед них велике значення мають процеси масопередачі в системі газ-рідина.

У класичних апаратах об'ємного типу газоподібний реагент зазвичай подається під мішалку через барботер різних конструкцій. Основним показником, що характеризує ефективність цих реакторів є поверхня контакту фаз, яка досягається перемішувачами, серед яких використовуються відкриті турбінні мішалки стандартного типу. В той же час в процесах, що супроводжуються хімічною реакцією, наприклад, процесах хлорування, сульфурвання, озонування і інших, якість і кількість продуктів реакції часто залежать: від раціонального вибору апаратурного оформлення, від способу вводу газового реагенту у зону реакції та загальної гідродинаміки в реакторі.

Ключові слова: сульфурвання, самоусмоктувальна мішалка, масообмінний апарат, система газ – рідина.

Вступ. Важливим фактором, що забезпечує ефективність гідродинамічних, теплових та масообмінних процесів, а також процесів хімічних перетворень є перемішування.

Аналіз конструкцій апаратів з перемішувачами, свідчить про наявність двох типів мішалок з нормальним впливом на середовище і з впливом, що носить характер деформації зсуву [1].

Найбільш простими з мішалок, що швидко обертаються, з нормальним впливом на середовище є турбінні. Було зроблено низку спроб удосконалення, мішалок, що є вимогами конкретних технологічних процесів. До таких удосконалених конструкцій слід віднести мішалки ежекційного типу, напіввідкриті мішалки, диспергуючі з перфорацією та з лопатками спеціальної форми.

Для деяких процесів, зокрема для процесів, що протікають в трифазних системах, застосовуються комбіновані мішалки або мішалки спеціальних конструкцій. Комбінування мішалок пов'язано очевидно, з тим, що окремі конструкції мішалок забезпечують одне з двох: або інтенсивне диспергування газу або рівномірний розподіл твердої фази. Поєднання зазначених конструкцій дає можливість як диспергування газу, так і рівномірно розподілити в об'ємі перемішування тверді частинки.

Експериментальна частина. Мішалки для диспергування часто оснащуються статором [2]. У цьому випадку значна частина енергії радіального потоку, що відкидається мішалкою, дисипується на статорних лопатках, диспергуючи одну з фаз. Різні конструкції статора дозволяють варіювати величину цієї енергії.

При апаратурному оформленні безперервних технологічних процесів, а також змішуванні взаємно нерозчинних рідин і насичення рідин газами практичну цінність становлять самоусмоктуючі мішалки. Пристрій для перемішування рідин (рисунок 1) складається з порожнистого циліндричного ротора 1

з осовим вхідним каналом 2, на твірній поверхні ротора є прорізи 3 з закріпленими радіальними порожнистими лопатями 4 циліндричної форми з вихідними отворами 5, на фронтальній поверхні лопаті вхідний канал має округлу форму, радіус якої складає 0,5-1,0 діаметр лопаті. На рисунку 1 вид А-А позначений поперечний перетин пристрою для перемішування рідин та його (Б) збільшене зображення з вказівкою радіуса округлення. За допомогою циліндра 6, розташованого в верхній частині, пристрій закріплюється на валу реактора.

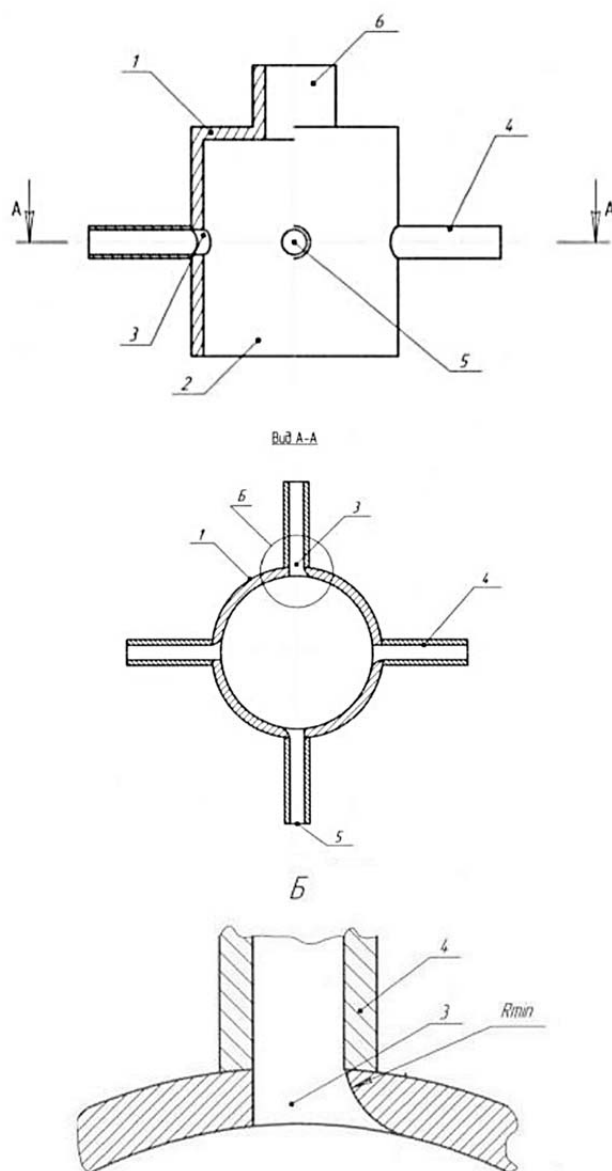


Рис. 1 Пристрій для проведення газорідних реакцій

При обертанні мішалки рідина засмоктується через вхідний канал 2 і під дією відцентрових сил витікає з порожнини ротора через вхідні канали 3 в середовище, що перемішується, утворюючи пучок струменів, що розходяться до площини обертання. При цьому відбувається інтенсивна турбулізація

рідини, що перемішується в області, що омивається лопатями мішалки.

При використанні перемішувачів пристроїв в реакторах для проведення рідкофазних процесів зазначена конструкція працює як в режимі примусової подачі компонентів, що змішуються, так і в режимі самоусмоктування, коли подача в змішувач забезпечується вакуумом на вході в ротор. З метою отримання відповідних залежностей проводилися дослідження визначення витрат рідини через порожнину ротора у зазначеному режимі. І тому застосовувалася установка, схема якої зображено на рисунку 2.

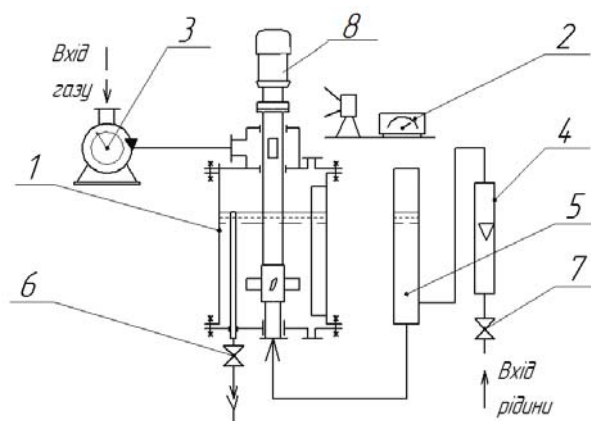


Рис. 2. Схема експериментального станда для проведення гідродинамічних випробувань в апараті об'ємного типу з самоусмоктуючими ежекційними мішалками: 1 – апарат об'ємного типу з самоусмоктуючою мішалкою; 2 – електронний стробоскопічний тахометр; 3 – газовий лічильник; 4 – ротамер для рідини; 5 – проміжний прозорий стакан; 6 – кран; 7 – регулюючий вентиль; 8 – електродвигун

Для визначення тривалості зміни до необхідного ступеня гомогенності були проведені експерименти в апаратах діаметром $D_{\text{ап}} = 0,26 \text{ м}$; $0,3 \text{ м}$; $0,4 \text{ м}$ з відбивачами перегородками розміру $0,1$ діаметра. Діаметр циліндричної частини ротора становить $d=0,065 \text{ м}$, кількість лопаток ротора – шість. Час гомогенізації визначалося кондуктометричним способом. В період проведення лабораторних випробувань було виготовлено два типи роторів, які відрізнялися конфігурацією вхідного каналу в порожнисті лопаті: з прямими вхідними кромками та зі змінною конфігурацією вхідної кромки, що прилягає до лобової поверхні порожнистої лопаті.

Ці мішалки, в разі необхідності, можуть працювати в режимі самоусмоктування по газовій фазі, по рідині або в режимі газ-рідина, для цього в самоусмоктуючих мішалках перекривалися газовий або рідинний канали за допомогою гумової пробки. В якості середовища, що перемішується застосовувалися дистильована вода і водно-гліцеринові розчини, трасером служив розчин хлориду барію. У ході проведення попередніх досліджень встановлено, що швидкість гомогенізації залежить, як співвідношен-

ня діаметрів мішалки та апарату, так і від співвідношення діаметрів мішалки та циліндричної частини ротора мішалки. Значною мірою час гомогенізації залежить від висоти заповнення апарату.

Висновки. У роботі [3,4] при дослідженні рівномірності розподілу фаз при розмішуванні взаємно нерозчинних рідин встановлено, що максимальна рівномірність розподілу фази можлива при використанні таких перемішувачів пристроїв, які забезпечують достатню аксильну швидкість для підйому фази на всю висоту апарату і зменшує радіальну складову, що створює градієнт концентрації по радіусу. З метою інтенсифікації процесу емульгування виявився доцільним, встановлений в апараті 1, роторно-струминний перемішувач пристрій 2 з порожнистими лопатками (рисунок 3). Пристрій [5] дозволяє прискорити процес емульгування і, крім того, статора теплоносія температура середовища підтримується на одному рівні.

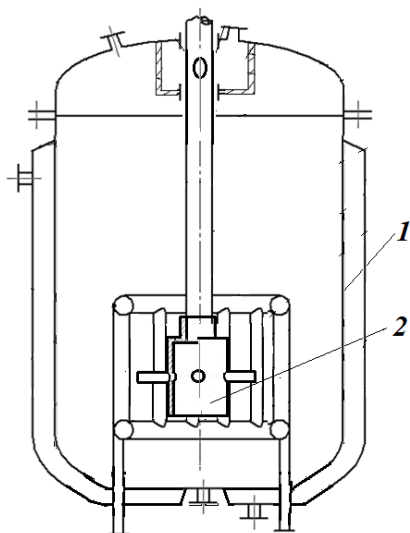


Рис. 3. Варіант виконання апарату з перемішувачим пристроєм для проведення процесу

Розроблені конструкції перемішувачів пристроїв успішно пройшли промислові випробування та впроваджені у виробництво зі значним економічним ефектом. Наприклад, у роботі пристрій було впроваджено у виробництво сульфону на стадії сульфування алкілбензолів газоподібним сірчанам ангідридом. Велика кількість патентів та авторських свідоцтв на методи апаратурного оформлення процесу сульфування вуглеводнів лише сірчанам ангідридом свідчить про недосконалість цього процесу. Однією з основних проблем сульфування вуглеводнів сірчанам ангідридом є відведення тепла реакції сульфування, т.к. це тепло виділяється практично миттєво при введенні газу в рідину. Реакційна маса, при будь-якому способі відведення тепла, має низький коефіцієнт тепловіддачі, що призводить до місцевих перегрівів реакційної маси. Спостерігається як погіршення якості продукту реакції, а й утворення гудрону, а окремих випадках, відбувається обугливание вуглеводнів.

Застосування пристрою дозволило вирішити проблему введення сірчаного ангідриду в реакційну масу і швидке відведення тепла із зони найбільш інтенсивної реакції сульфування, що протікає.

Л і т е р а т у р а

1. Войнов Н.А. Современные проблемы и методы биотехнологии: Красноярск: ИПК СФУ, 2009. 418 с.
2. Methods of Mixing Liquids and Apparatus therefor . пат 1104032 Великобритания. МПК В01F. опубл. 21.02.68
3. Бальцежак С.В. Гидродинамика и массоотдача в жидкой фазе у границы газ-жидкость в двухфазных (газ-жидкость) и трехфазных (газ-жидкость-твердое тело) системах в барботажных аппаратах с механическим перемешиванием. дис. канд. техн. наук: 05.17.08, 1982. 205 с.
4. Шабрацкий В.И., Мартыненко Н.А. Сульфирование углеводородов в производстве сульфенола НП-3. Химия и химическая технология. 1987. (№ 4) С. 36-38.
5. Пристрій для перемішування рідин пат 60097 Україна Опубл. 2011 р., Бюл. № 11.

References

1. Vojnov N.A. Sovremennye problemy i metody biotekhnologii: Krasnojarsk : IPK SFU, 2009. 418 s.
2. Methods of Mixing Liquids and Apparatus therefor . пат 1104032 Velikobritanija. MPK V01F. opubl. 21.02.68
3. Bal'cezhak S. V. Gidrodinamika i massootdacha v zhidkoj faze u granicy gaz-zhidkost' v dvuhfaznyh (gaz-zhidkost') i trehfaznyh (gaz-zhidkost'-tverdoe telo) sistemah v barbotazhnyh apparatah s mehanicheskim peremeshivaniem. dis. kand. tehn. nauk: 05.17.08, 1982. 205s.
4. Shabrackij V.I., Martynenko N.A. Sul'firovanie uglevodov v proizvodstve sul'fonola NP-3. Himija i himicheskaja tehnologija. 1987. (№ 4) S. 36-38.
5. Pristrij dlja peremishuvannja ridin pat 60097 Ukraine Opubl. 2011 r., Bjul. № 11.

Shabratsky S.V., Shabratsky V.I., Taranenko G.V. Development and use of ejection type mixing devices

Reaction vessels with mixing devices are often used in the chemical and petrochemical industry for gas-liquid mass transfer processes in which the mixing has a decisive influence on the process. During the rotation of the mixer in the tank, flows with different speeds and directions are generated, which cause turbulent and circulation currents the intensity of which depends on the constructive features of the mixing device, rotation speed and properties of the mixed fluid. Most recently, in tank vessels designed for gas-liquid reactions, self-sucking mixers have been used as mixing devices, which, according to the authors, are more efficient due to the fact that the carrying out of these processes in proposed reactors does not require any extra capacity in addition to reagent gas feeding lines or an extra stage for exhaust gas purification which would make the process scheme more complicated. This is especially noticeable when using reaction vessels with self-sucking mixers for carrying out sulfonation reactions of aromatic hydrocarbons with sulfur trioxide-air mixtures or in chlorination of hydrocarbons with gaseous chlorine, the quality of which reactions affects the yield of the end product. The new self-sucking mixing devices is proposed, in addition to their main function – absorption and distribution of gas reagent – must perform a rational distribution of the energy in-

roduced into the reaction zone in accordance with the specific processes and provide an initial contact of reagents under positive displacement conditions. Such conditions can be created by means of self-sucking mixers by placing within a hollow rotor of ejection membrane which allows both the gas and fluid reagents be sucked simultaneously. Also, the great interest is the issue of mixing power determination of mixers designed for processes in gas-liquid systems, which can be an essential component in designing reaction vessels using effective mixing devices of self-sucking type for both liquid and gaseous phases. For this reason, the mixing power calculation of self-sucking mixers for gas-liquid processes is an important part in the design of reaction vessels.

Keywords: sulfonation, chlorination, ozonation, flow coefficient, self-priming mixer, indanthrone, anthraquinone, alkyl benzene.

Шабрацький Сергій Володимирович – к.т.н., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк), shabrackij_sv@snu.edu.ua

Шабрацький Віктор Іванович – к.т.н., доц., доцент кафедри фармації, виробництва та технологій, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк), shabrackij@snu.edu.ua

Тараненко Геннадій Володимирович – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк), taranenko_gv@snu.edu.ua

Стаття подана 03.02.2022 р.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-272-2-110-115>

УДК 621.745.55:629.1.01

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЛОКАЛЬНОЇ ПОВЕРХНЕВОЇ ЛАЗЕРНОЇ ОБРОБКИ НА СТРУКТУРУ ШВИДКОРІЗАЛЬНИХ ТА ШТАМПОВИХ СТАЛЕЙ

Шевченко О.В.

STUDY OF THE INFLUENCE OF LOCAL SURFACE LASER TREATMENT ON THE STRUCTURE OF QUICK-CUTTING STEEL AND STAMP STEEL

Shevchenko O.V.

У статті досліджено вплив параметрів режиму локальної поверхневої лазерної обробки на структуру швидкорізальних та інструментальних сталей. Для оцінювання можливості поверхневого оплавлення інструменту при його лазерному гартуванні запропоновано використовувати комплексний параметр режиму лазерної обробки – критичну щільність потужності лазерного випромінювання. Щільність потужності лазерного випромінювання є комплексним параметром режиму обробки, який пов'язує між собою діаметр лазерного променя, його потужність та швидкість переміщення лазерного променя відносно оброблюваного виробу. Встановлено оптимальні значення щільності потужності лазерного випромінювання, при якій попереджається поверхневе оплавлення оброблюваних матеріалів та водночас досягається максимальна мікротвердість поверхневого зміцненого шару. Експериментально доведено, що саме високотемпературне гартування з твердого стану дає можливість отримати максимальну мікротвердість та дисперсність структури загартованого шару. Обробка з оплавленням поверхні є небажаною внаслідок різкого зменшення мікротвердості загартованого шару через утворення значної кількості залишкового аустеніту. Встановлено, що глибина зміцненого шару залежить від вихідної мікроструктури оброблюваних матеріалів. Максимальна глибина зміцненого шару досягається у тому випадку, коли перед лазерним опромінюванням інструментальні швидкорізальні та штампові сталі піддаються об'ємному гартуванню та відпуску за типовими режимами. Встановлено, що основною причиною збільшення глибини зміцненого шару у цьому випадку є менша теплопровідність загартованих сталей у порівнянні із сталями, що знаходяться у рівноважному стані. Визначено оптимальні значення коефіцієнта перекриття лазерних доріжок, при якому досягається мінімальна ширина зон відпуску.

Ключові слова: швидкорізальні сталі, інструментальні штампові сталі, мікротвердість, зносостійкість, лазерна обробка.

Вступ. Відомо, що структурні перетворення, що відбуваються у швидкорізальних та інструментальних штампових сталях при їхньому поверхне-

вому лазерному зміцненні, залежать не тільки від параметрів режиму лазерної обробки, але й від структури оброблюваного матеріалу [1]. Для розробки технології лазерного зміцнення необхідно отримати дані, що дозволяють з'ясувати закономірності структурних перетворень в оброблюваних матеріалах залежно від потужності лазерного випромінювання, діаметра лазерного променя та швидкості його переміщення відносно оброблюваного виробу.

У цьому контексті дуже важливе значення має оцінка впливу параметрів режиму лазерної обробки а також вихідної структури сталей на розподіл мікротвердості по товщині загартованого шару та на його мікроструктуру. Наявність таких даних дозволить визначити діапазони значень потужності лазерного випромінювання, діаметрів лазерного променя та швидкостей його переміщення відносно оброблюваних виробів, при яких досягається максимальна мікротвердість та максимальна глибина зміцненого шару.

У разі обробки довгомірних та великогабаритних виробів необхідно враховувати коефіцієнт перекриття лазерних доріжок, від якого залежить ширина зон відпуску, в яких спостерігається зменшення мікротвердості.

Відомо [2 - 4], що в високолегованих інструментальних сталях X12, P6M5, P18, P6M5K5 дифузійна рухливість атомів вуглецю є досить невисокою. Внаслідок цього при невисокій енергії лазерного випромінювання процес гомогенізації аустеніту може пройти неповністю. Це призводить до утворення у зміцненому шарі низьколегованого мартенситу із зниженою мікротвердістю та зносостійкістю. При надто високій енергії випромінювання, особливо при локальному поверхневому оплавленні, утворюється загартований шар з дуже великим вмістом (до 80 об. %) залишкового аустеніту, який характеризується невисокою мікротвердістю та здатністю до ін-

тенсивного пластичного деформування у процесі експлуатації інструменту [5].

З вищесказаного витікає, що при локальному поверхневому лазерному зміцненні інструментальних сталей в структурі загартованого шару необхідно отримати високолегований мартенсит та водночас виключити надмірне розчинення карбідів задля мінімізації вмісту залишкового аустеніту.

У зв'язку з цим **метою роботи** є визначення оптимальних параметрів режиму поверхневої зміцнювальної лазерної обробки швидкорізальних та штампових сталей, які дозволяють отримати максимальну мікротвердість та максимальну глибину загартованого шару без оплавлення оброблюваного матеріалу.

Завдання дослідження:

1. Визначити діапазони значень потужності лазерного випромінювання, діаметрів лазерного променя та швидкостей його переміщення відносно оброблюваних виробів, при яких досягається максимальна мікротвердість та максимальна глибина зміцненого шару без його оплавлення.

2. Дослідити вплив вихідної структури швидкорізальних та штампових сталей на розподіл мікротвердості по глибині зміцненого шару, що утворюється при поверхневій лазерній обробці.

3. Дослідити вплив коефіцієнта перекриття лазерних доріжок на ширину зон відпуску, в яких відбувається часткове зменшення.

Основна частина. Потужність лазерного випромінювання, діаметр лазерного променя та швидкість його переміщення відносно оброблюваного виробу є трьома основними факторами, які безпосередньо впливають на характер нагрівання та охолодження матеріалу, що піддається обробці. Задля можливості узагальненого аналізу цих трьох факторів на процес формування структури загартованого шару скористуємось таким поняттям як щільність потужності лазерного випромінювання [6]. Оскільки вираз для визначення щільності потужності лазерного випромінювання, запропонований в роботі [6], містить водночас і потужність лазерного випромінювання, і діаметр лазерного променя, і швидкість переміщення лазерного променя відносно оброблюваного виробу, при постановці експериментів достатньо варіювати лише один з цих параметрів, а два інші параметри залишити без змін.

Методика проведення експериментальних досліджень. Для дослідження були обрані високолеговані інструментальні штампові та швидкорізальні сталі марок X12M, P6M5, P6M5K5, P18. Сталі піддавались лазерному зміцненню у відпаленому стані (ізотермічний відпал та типовими режимами [7]), а також після гартування та відпуску за відповідними типовими режимами [7] (швидкорізальні сталі піддавались трикратному відпуску [7]).

Лазерна обробка інструментальних сталей здійснювалась на установці «ЛІАТУС - 31» у режимі безперервного випромінювання. Потужність випромінювання становила 1 кВт, діаметр лазерного про-

меня – 2 мм. Ці два параметри режиму обробки залишались незмінними. Щільність потужності лазерного випромінювання змінювалась за рахунок зміни швидкості переміщення лазерного променя відносно оброблюваних зразків в межах 4 - 12 мм/с. В якості оброблюваних зразків використовувались пластини товщиною 10 мм з розміром у плані 50 x 50 мм.

Дослідження мікроструктури проводилося на оптичному мікроскопі МІМ-8М, вимірювання мікротвердості зразків – на мікротвердомір ПМТ-3.

Результати експериментальних досліджень та їхній аналіз. Експериментальні зразки з інструментальних сталей P6M5, P6M5K5, P18 та X12M оброблялись при щільності потужності лазерного випромінювання від $0,4 \cdot 10^4$ до $1,4 \cdot 10^4$ Вт/см². На рис. 1 наведено залежність мікротвердості досліджуваних сталей від щільності потужності лазерного випромінювання. Мікротвердість вимірювалась на відстані 0,1 - 0,15 мм від зовнішньої обробленої поверхні зразків. Усі зразки піддавались попередній термічній обробці – об'ємному гартуванню та відпуску за типовими режимами [7]. Метою першої серії експериментів було визначення оптимальної щільності потужності лазерного випромінювання, при якій досягається максимальна мікротвердість загартованого шару та водночас не відбувається його оплавлення.

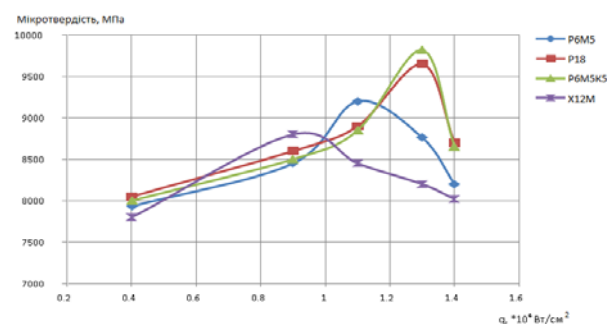


Рис. 1. Вплив щільності потужності лазерного випромінювання на максимальні значення мікротвердості загартованого шару: гартування + відпуск [7]

При лазерній обробці сталі P6M5 максимальні значення мікротвердості (близько 9195 МПа) досягаються при щільності потужності лазерного випромінювання $1,1 \cdot 10^4$ Вт/см². При щільності потужності випромінювання $0,4 \cdot 10^4$ Вт/см² мікротвердість складає 7830 МПа, при щільності потужності випромінювання $0,9 \cdot 10^4$ Вт/см² – 8450 МПа. Збільшення щільності потужності випромінювання до $1,3 \cdot 10^4$ Вт/см² призводить до зменшення мікротвердості до 8200 МПа (рис. 1). Подальше збільшення щільності потужності призводить до утворення оплавленого шару з мікротвердістю не вище 7000 МПа.

При лазерній обробці сталей P6M5K5 та P18 максимальні значення мікротвердості (9650 - 9820 МПа) досягаються при щільності потужності лазерного випромінювання $1,3 \cdot 10^4$ Вт/см². При щільності потужності випромінювання $0,4 \cdot 10^4$ Вт/см² мікрот-

вердість складає 8050 МПа, при щільності потужності випромінювання $0,9 \cdot 10^4$ Вт/см² – 8500 МПа, при щільності потужності випромінювання $1,1 \cdot 10^4$ Вт/см² – 8850 МПа (рис. 1). Збільшення щільності потужності випромінювання вище $1,4 \cdot 10^4$ Вт/см² є небажаним, оскільки при цьому утворюється оплавлений шар із значним вмістом залишкового аустеніту та відносно невеликою мікротвердістю (до 7200 МПа).

При лазерній обробці сталі X12M максимальні значення мікротвердості (8800 МПа) досягаються при щільності потужності лазерного випромінювання $0,9 \cdot 10^4$ Вт/см². При збільшенні щільності потужності лазерного випромінювання до $1,1 \cdot 10^4$ Вт/см² мікротвердість загартованого шару знижується до 8020 – 8100 МПа (рис. 1). При подальшому збільшенні щільності потужності лазерного випромінювання мікротвердість загартованого шару стрімко зменшується внаслідок його оплавлення. Мікротвердість в оплавленій зоні не перевищує 7000 МПа.

Мікроструктура зони оплавлення у всіх досліджуваних сталях має дендритну структуру. Кристали витягнуті у напрямку тепловідведення. Однак, слід зауважити, що дисперсність кристалів мартенситу та залишкового аустеніту вища, ніж після об'ємного гартування. Від основного металу зону зміцнення відокремлює вузька перехідна зона (рис. 2, 3).

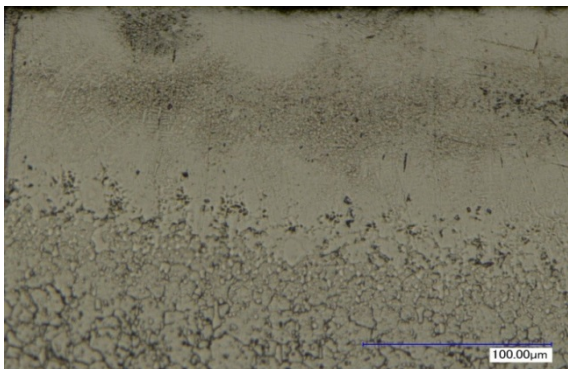


Рис. 2. Мікроструктура сталі P6M5K5 після обробки при щільності потужності лазерного випромінювання $q = 1,4 \cdot 10^4$ Вт/см² (швидкість переміщення лазерного променя $V = 10$ мм/с): оплавлена зона (зона гартування з рідкого стану; тонка перехідна зона з підвищеною мікротвердістю (зона гартування з твердого стану); основний метал; х600

При обробці без оплавлення у зміцненому шарі утворюється мартенситно-карбідна структура з невеликим вмістом залишкового аустеніту (рис. 4). Мікротвердість загартованого шару залежить від ступеня пересичення мартенситу легуючими елементами. При недостатній щільності потужності лазерного випромінювання утворюється низьколегований мартенсит. При цьому загартований шар містить надмірну кількість надлишкових карбідів, що суттєво знижує його ударну в'язкість. Низьколегований мартенсит доволі легко піддається травленню

у 5 %-му розчині азотної кислоти в етиловому спирті. Високолегований мартенсит практично ніяк не реагує на дію цього хімічного реактиву і утворює суцільне світле поле на мікрошліфі (рис. 4).



Рис. 3. Мікроструктура сталі P18 після обробки при щільності потужності лазерного випромінювання $q = 1,4 \cdot 10^4$ Вт/см² (швидкість переміщення лазерного променя $V = 10$ мм/с): оплавлена зона (зона гартування з рідкого стану; тонка перехідна зона з підвищеною мікротвердістю (зона гартування з твердого стану); основний метал; х600

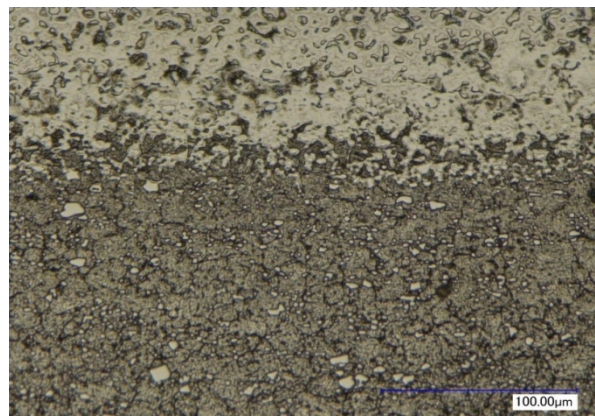


Рис. 4. Мікроструктура сталі P6M5K5 після обробки при щільності потужності лазерного випромінювання $q = 1,3 \cdot 10^4$ Вт/см² (швидкість переміщення лазерного променя $V = 10$ мм/с): загартований не оплавлений світлий шар; тонка перехідна зона; основний метал; х600

В сталі P6M5 максимальне пересичення мартенситу легуючими елементами без оплавлення поверхневого зміцненого шару досягається при щільності потужності лазерного випромінювання $q = 1,1 \cdot 10^4$ Вт/см², в сталях P6M5K5 та P18 – при щільності потужності лазерного випромінювання $q = 1,3 \cdot 10^4$ Вт/см², в сталі X12M – при щільності потужності лазерного випромінювання $q = 0,9 \cdot 10^4$ Вт/см².

На другому етапі досліджень було встановлено вплив вихідного стану оброблюваних сталей на розподіл мікротвердості по глибині зміцненого шару. При цьому обробка здійснювалась при такій щільності потужності лазерного випромінювання, котра забезпечувала максимальне пересичення мартенситу легуючими елементами без оплавлення поверхневого шару. Розподіл мікротвердості по глибині зміц-

неного шару в сталях Р6М5, Р6М5К5, Р18 та Х12М наведено на рис. 5 - 8. Результати вимірювань мікротвердості показали, що найбільшій глибини загартованого шару (0,5 - 0,6 мм) вдається добитись при лазерній обробці сталей, які попередньо були піддані об'ємному гартуванню та відпуску за типовими режимами [7]. Підвищена глибина загартованого шару у цьому випадку обумовлена насамперед відносно невеликою теплопровідністю інструментальних сталей після їхнього об'ємного гартування. При використанні для обробки відпалених сталей глибина загартованого шару зменшується приблизно вдвічі (рис. 5 - 8). Таким чином, перед лазерним зміцненням швидкорізальних та високолегованих хромистих штампових сталей необхідно провести їхню попередню термічну обробку у вигляді об'ємного гартування та відпуску за типовими режимами [7]. Зазвичай, у виробничих умовах така обробка є обов'язковою, оскільки саме вона забезпечує об'ємну міцність сталей.

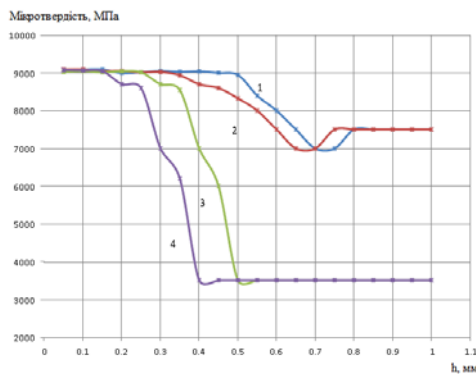


Рис. 5. Вплив попередньої термічної обробки сталі Р6М5 на розподіл мікротвердості по глибині загартованого шару, отриманого подальшою лазерною обробкою: $q = 1,1 \cdot 10^4$ Вт/см²: 1 - гартування + трикратний відпуск, $V = 8$ мм / с; 2 - гартування + трикратний відпуск, $V = 10$ мм / с; 3 - відпал, $V = 8$ мм / с; 4 - відпал, $V = 10$ мм/с

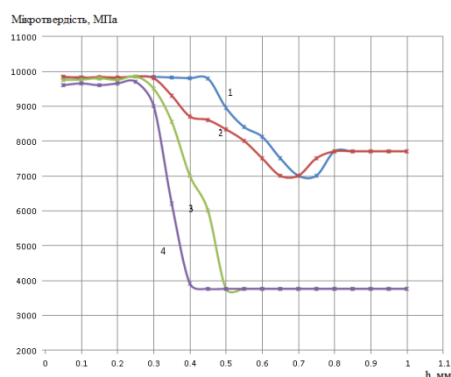


Рис. 6. Вплив попередньої термічної обробки сталі Р6М5К5 на розподіл мікротвердості по глибині загартованого шару, отриманого подальшою лазерною обробкою: $q = 1,3 \cdot 10^4$ Вт/см²: 1 - гартування + трикратний відпуск, $V = 8$ мм / с; 2 - гартування + трикратний відпуск, $V = 10$ мм / с; 3 - відпал, $V = 8$ мм / с; 4 - відпал, $V = 10$ мм/с

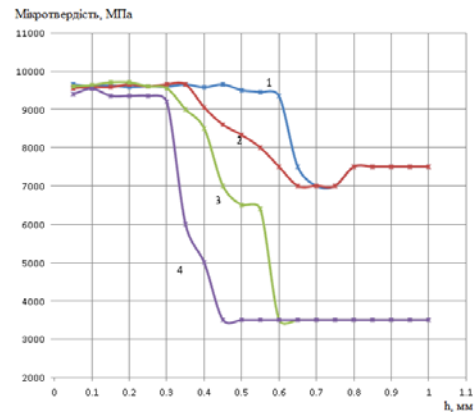


Рис. 7. Вплив попередньої термічної обробки сталі Р18 на розподіл мікротвердості по глибині загартованого шару, отриманого подальшою лазерною обробкою: $q = 1,3 \cdot 10^4$ Вт/см²: 1 - гартування + трикратний відпуск, $V = 8$ мм / с; 2 - гартування + трикратний відпуск, $V = 10$ мм / с; 3 - відпал, $V = 8$ мм / с; 4 - відпал, $V = 10$ мм/с

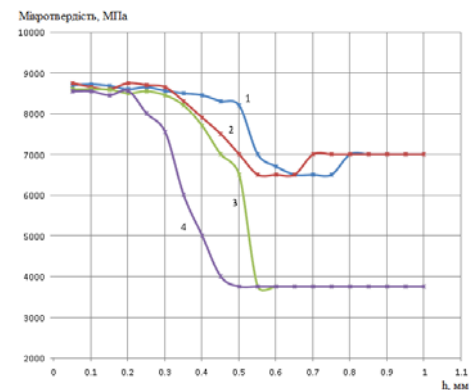


Рис. 8. Вплив попередньої термічної обробки сталі Х12М на розподіл мікротвердості по глибині загартованого шару, отриманого подальшою лазерною обробкою: $q = 0,9 \cdot 10^4$ Вт/см²: 1 - гартування + трикратний відпуск, $V = 8$ мм / с; 2 - гартування + трикратний відпуск, $V = 10$ мм / с; 3 - відпал, $V = 8$ мм / с; 4 - відпал, $V = 10$ мм/с

При обробці з перекриттям лазерних доріжок відбувається повторне нагрівання та охолодження попередньо оброблених ділянок матеріалу. Та частина зони лазерного впливу, де відбувається нагрівання вище за температуру критичної точки A_{c1} , за своєю структурою не відрізняється від вихідної структури загартованого матеріалу. Тут відбувається звичайна фазова перекристалізація з наступним гартуванням. У тій частині зони лазерного впливу, де нагрівання відбувається нижче за температуру критичної точки A_{c1} , відбувається відпуск попередньо сформованої мартенситно-аустенітної структури. Внаслідок цього в даній зоні виникає високодисперсна структура трооститу відпуску із зниженою мікротвердістю.

Для визначення оптимального коефіцієнта перекриття лазерних доріжок з метою забезпечення повного опромінення поверхні та зменшення розмірів зон відпуску було проведено серію експеримен-

тів із варіюванням коефіцієнта перекриття лазерних доріжок (K_n). Під коефіцієнтом перекриття (K_n) розуміється відношення відстані між геометричними центрами двох сусідніх лазерних доріжок до їхньої ширини. Експерименти проводились із використанням зразків, виготовлених зі сталі Р6М5 (пластини товщиною 10 мм з розміром у плані 50 x 50 мм). Щільність міцності лазерного випромінювання складала $q = 1,1 \cdot 10^4$ Вт/см² (потужність лазерного випромінювання 1000 Вт, діаметр лазерного променя 2 мм, швидкість переміщення лазерного променя відносно зразка 8 мм/с). Коефіцієнт перекриття лазерних доріжок складав 0,7; 0,85 та 1 (відсутність перекриття). Результати випробувань представлені на рис. 9 - 11. При $K_n = 0,7$ (рис. 9) в зонах перекриття спостерігається зниження мікротвердості приблизно до 7000 МПа через відпуск сталі при повторному нагріванні (ділянки червоного кольору). Ширина зон відпуску становить близько 1 мм.

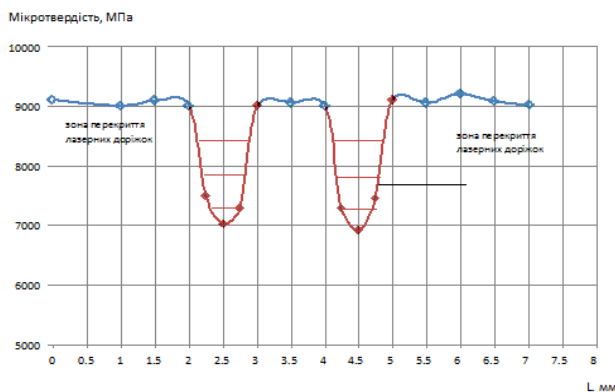


Рис. 9. Розподіл мікротвердості при коефіцієнті перекриття лазерних доріжок $K_n = 0,7$; сталь Р6М5: сині ділянки - висока мікротвердість, червоні ділянки - знижена мікротвердість (зони відпуску)

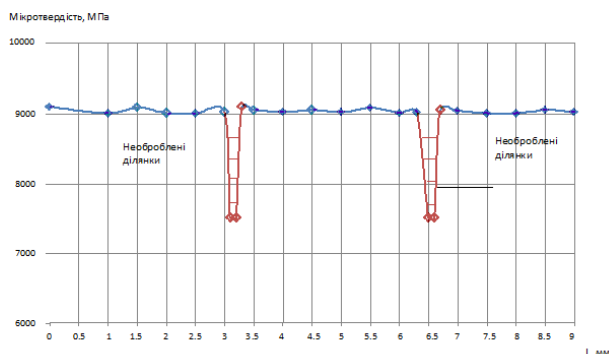


Рис. 10. Розподіл мікротвердості при коефіцієнті перекриття лазерних доріжок $K_n = 1,0$; сталь Р6М5: сині ділянки - висока мікротвердість, червоні ділянки - знижена мікротвердість (необроблені ділянки)

У випадку, коли $K_n = 1$ (рис. 10), тобто при обробці без перекриття, зони відпуску майже відсутні. Проте, є і неопромінені ділянки з мікротвердістю, що дорівнює мікротвердості вихідної структури (ділянки червоного кольору). У випадку $K_n = 0,85$ (рис.

11) спостерігається стабільне високе значення мікротвердості загартованого шару (9000 МПа), а ширина зон відпуску є мінімальною – не більше 0,5 мм (ділянки червоного кольору).

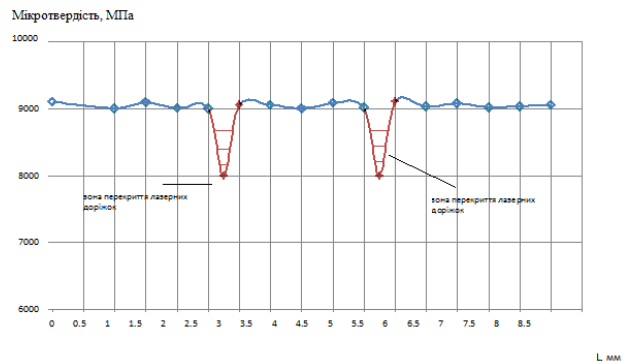


Рис. 11. Розподіл мікротвердості при коефіцієнті перекриття лазерних доріжок $K_n = 0,85$; сталь Р6М5: сині ділянки - висока мікротвердість, червоні ділянки - знижена мікротвердість (зони відпуску)

Висновки

1. Лазерне зміцнення інструменту із швидкорізальних сталей слід проводити без оплавлення поверхневого шару. Гартування з твердого стану дає можливість отримати максимальну мікротвердість та дисперсність структури загартованого шару. Обробка з оплавленням поверхні є небажаною внаслідок різкого зменшення мікротвердості загартованого шару через утворення значної кількості залишкового аустеніту.

2. Глибина зміцненого шару залежить від вихідної мікроструктури оброблюваних матеріалів. Максимальна глибина зміцненого шару досягається у тому випадку, коли перед лазерним опромінюванням інструментальні швидкорізальні сталі піддають об'ємному гартуванню та трикратному відпуску.

3. Визначено оптимальні значення коефіцієнта перекриття лазерних доріжок, при якому досягається мінімальна ширина зон відпуску та повна відсутність необроблених ділянок.

Література

1. Дубняков В.Н., Ковалев А.И., Кашук О.Л. Роль мартенситного превращения в упрочнении стали при лазерной обработке и последующей деформации // М и ТОМ, 2008. № 9. С. 54 – 57.
2. Забелин А.М. Лазерные технологии в машиностроении / А.М. Забелин, А.М. Оришин, А.М. Чирков. – Новосибирск: Изд-во Новосибирского гос. тех. ун-та, 2014. – 142с.
3. Гуреев Г.Д. Влияние лазерной и лазерно-ультразвуковой обработок на изменение износостойкости поверхностей трения стали // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки, 2017. № 2. С. 138 – 144.
4. Кремнев Л.С. Упрочнение рабочих поверхностей плоскопараллельных концевых мер длины лазерным излучением // ФиХОМ, 2020. № 3. С. 13 – 16.

5. Веденов А.А. Физические процессы при лазерной обработке материалов. – М.: Машиностроение, 2019. 428с.
6. Абильтинтов Г.А. Физические основы обработки материалов лучами лазера. – М.: Машиностроение, 2016. 2283с.
7. Гольдштейн М.И. Специальные стали. – М.: Metallurgiya, 1998. 408с.

References

1. Dubnyakov V.N., Kovalev A.I., Kashchuk O.L. Rol martensitnogo prevrashcheniya v uprochnenii stali pri lazernoj obrabotke i posleduyushchej deformacii // *MiTOM*, 2008. № 9. S. 54 – 57.
2. Zabelin A.M. Lazernye tekhnologii v mashinostroenii / A.M. Zabelin, A.M. Orishin, A.M. Chirkov. – Novosibirsk: Izd-vo Novosibirskogo gos. tekhn. un-ta, 2014. – 142s.
3. Gureev G.D. Vliyaniye lazernoj i lazerno-ultrazvukovoj obrabotki na izmeneniye iznosostojkosti poverhnostej treniya stali // *Vestnik Samar. gos. tekhn. un-ta. Ser.: Fiz.-mat. nauki*, 2017. № 2. S. 138 – 144.
4. Kremnev L.S. Uprochneniye rabochih poverhnostej ploskoparallelnykh koncevykh mer dliny lazernym izlucheniem // *FiHOM*, 2020. № 3. S. 13 – 16.
5. Vedenev A.A. Fizicheskie processy pri lazernoj obrabotke materialov. – M.: Mashinostroenie, 2019. 428s.
6. Abilsintov G.A. Fizicheskie osnovy obrabotki materialov luchami lazera. – M.: Mashinostroenie, 2016. 2283s.
7. Goldshtejn M.I. Specialnye stali. – M.: Metallurgiya, 1998. 408s.

Shevchenko O.V. Study of the influence of local surface laser treatment on the structure quick-cutting steel and stamp steel

In the article, the influence of the parameters of the mode of local surface laser processing on the structure of high-speed and die steels is studied. To assess the possibility of surface melting of the tool during its hardening, it is proposed to use a complex parameter of the laser processing

mode - the critical power density of laser radiation. The power density of laser radiation is a complex parameter of the processing mode, which relates the diameter of the laser beam, its power and the speed of the laser beam relative to the workpiece. The optimal values of the laser radiation power density are established, at which the surface melting of the processed materials is prevented and at the same time the maximum microhardness of the surface hardened layer is achieved. It has been experimentally proven that it is high-temperature hardening from the solid state that makes it possible to obtain the maximum microhardness and maximum dispersion of the structure of the hardened layer. Processing with reflow of the surface is undesirable due to a sharp decrease in the microhardness of the hardened layer due to the formation of a significant amount of residual austenite. It has been established that the depth of the hardened layer depends on the initial microstructure of the processed materials. The maximum depth of the hardened layer is achieved when, before laser irradiation, tool high-speed and die steels are subjected to bulk hardening and tempering according to standard conditions. It has been established that the main reason for the increase in the depth of the hardened layer in this case is the lower thermal conductivity of hardened steels compared to steels with an equilibrium structure. The optimal values of the overlapping coefficient of laser paths are determined, at which the minimum width of the tempering zones is achieved.

Key words: quick-cutting steel, stamp steel, microhardness, wear resistance, laser treatment.

Шевченко Олександр Володимирович – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк), shew.cmw@ukr.net

Стаття подана 31.01.2022 р.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-272-2-116-119>

УДК 621.3.022

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВИМИКАЧІВ РІЗНИХ ТИПІВ

Романченко Ю.А.

COMPARATIVE ANALYSIS OF HIGH VOLTAGE SWITCHES OF DIFFERENT TYPES

Romanchenko J.A.

У статті наведено порівняльний аналіз характеристик повітряних, масляних, вакуумних та елегазових високовольтних вимикачів, що використовуються на електричних підстанціях. Дані вимикачі є досить складною конструкцією, керованою електромагнітними, пружинними, гідравлічними або пневматичними приводами та розділяються на кілька типів залежно від середовища, у якому здійснюють гасіння дуги.

Аналіз літературних джерел показав, що повітряні вимикачі, як найменш ефективні, великі за габаритними розмірами та дорогі в обслуговуванні, у наш час практично не використовуються, всі старі повітряні вимикачі поступово замінюють ефективнішими та надійнішими вимикачами. Тому в статті проаналізовано характеристики масляних, вакуумних та елегазових високовольтних вимикачів, розглянуто їх переваги та недоліки в різних умовах, які враховують при виборі вимикачів. Виконано порівняння найважливіших характеристик високовольтних вимикачів, таких як механічна міцність, електрична міцність дугогасного середовища, комутаційний ресурс вимикача – кількість циклів роботи вимикача, вага вимикача. Показано, що дуже важливим питанням є експлуатація високовольтних вимикачів, їх обслуговування – проведення періодичних капітальних та поточних ремонтів, а також позапланових (аварійних) ремонтів. Розглянуто питання впливу обладнання електроустановок на навколишнє середовище. Для захисту навколишнього середовища необхідно мінімізувати кількість шкідливих речовин, що потрапляє до навколишнього середовища. Порівняльний аналіз високовольтних вимикачів показав, що найбільш ефективними, якісними, надійними є елегазові та вакуумні високовольтні вимикачі. Провідні виробники комутаційних апаратів даного типу з кожним роком дедалі більше удосконалюють продукцію, роблячи її надійнішою та ефективнішою. Тому в наш час масляні вимикачі практично не випускаються. При будівництві нових об'єктів та технічному переоснащенні старих, віддається перевага виключно елегазовим та вакуумним високовольтним вимикачам. Тільки такі вимикачі здатні забезпечити високу надійність електропостачання споживачів та повною мірою забезпечити свої експлуатаційні характеристики, при цьому вони повністю відповідають нормам безпеки обслуговування, пожежної безпеки та екологічності.

Ключові слова: високовольтний вимикач, механічна міцність, електрична міцність, дугогасне середовище, вакуум, елегаз.

Вступ. Сучасний рівень розвитку електроенергетики пред'являє все більш високі вимоги до надійності і ресурсу електроенергетичного обладнання і перш за все до високовольтних вимикачів змінної напруги. Високовольтні вимикачі – ключова ланка енергетичної системи. Від них залежить надійність енергопостачання споживачів, і функціональна безпека роботи енергосистеми. Від якості та безвідмовності їхньої роботи залежить надійність електропостачання споживачів, а також збереження цілісності обладнання у разі виникнення аварійних ситуацій [1]. Отже, питання вибору високовольтних вимикачів одне із найважливіших.

Мета статті. Метою роботи є порівняльний аналіз характеристик повітряних, масляних, вакуумних та елегазових високовольтних вимикачів.

Результати дослідження. Вимикачі, що використовуються на електричних підстанціях, повинні мати дуже велику номінальну напругу (6-1150 кВ) і дуже великий струм відключення (до 50 кА). Дані вимикачі є досить складною конструкцією, керованою електромагнітними, пружинними, гідравлічними або пневматичними приводами [2]. Залежно від середовища, у якому здійснюють гасіння дуги, розрізняють кілька типів вимикачів: повітряні, масляні, вакуумні та елегазові [3].

Дослідження, розробка та впровадження в експлуатацію вимикачів високої напруги як силового комутаційного обладнання почалися з масляних і маломасляних вимикачів (1920-1950-ті рр.). Далі в експлуатації з'явилися досконаліші повітряні вимикачі (1940-1960-ті рр.), потім – вакуумні і елегазові вимикачі [1].

Аналіз літературних джерел показав, що повітряні вимикачі (рис. 1,а), як найменш ефективні, великі за габаритними розмірами та дорогі в обслуговуванні, у наш час практично не використовуються, всі старі повітряні вимикачі поступово замінюють ефективнішими та надійнішими вимикачами. Тому проаналізуємо характеристики масляних (рис. 1,б), вакуумних (рис. 1,в) та елегазових (рис. 1,г) високовольтних вимикачів, розглянувши їх переваги та не-

доліки в різних умовах, які враховують при виборі вимикачів [4]

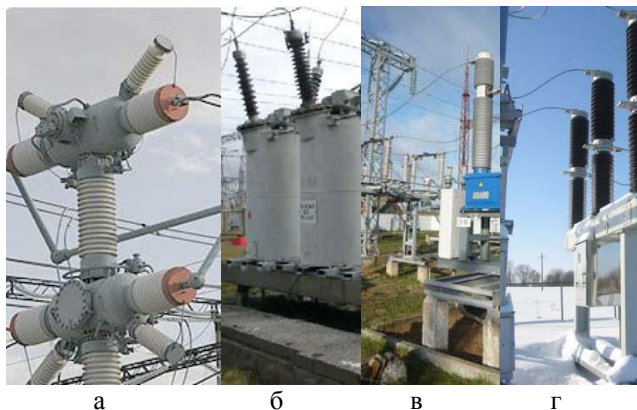


Рис. 1. Високовольтні вимикачі різних типів:
а – повітряні вимикачі, б – масляні вимикачі,
в – вакуумні вимикачі, г – елегазові вимикачі

Однією з найважливіших характеристик є механічна міцність вимикачів. У цьому випадку, чим простіше конструкція, тим вища механічна міцність вимикача. Якщо розглядати три типи комутаційних апаратів, то найпростішу конструкцію і, відповідно, більш високу механічну міцність має вакуумний вимикач, найменшу міцність – масляний вимикач.

Електрична міцність дугогасного середовища – одна з найважливіших характеристик вимикачів. В даному випадку елегаз має найвищу діелектричну міцність, особливо на напрузі 110 кВ та вище. Дугогасне середовище вакуумних вимикачів на напругу до 110 кВ включно не поступається електричною міцністю елегазовим. Масляні вимикачі характеризуються нижчою електричною міцністю дугогасного проміжку.

Не менш важливою характеристикою є комутаційний ресурс вимикача – кількість циклів роботи вимикача. Кількість циклів включень та відключень вимикача залежить від величини комутуваних струмів. У цьому разі, що більше струм, то швидше вимикач вичерпує свій комутаційний ресурс. Вакуумний вимикач, після вичерпання комутаційного ресурсу підлягає заміні. Елегазовий вимикач після вичерпання ресурсу підлягає капітальному ремонту, у процесі якого оцінюється стан вимикача, встановлюється можливість подальшої експлуатації комутаційного апарату [5]. Масляний вимикач має значно менший міжремонтний ресурс. Як правило, після семи автоматичних відключень струмів короткого замикання необхідно виконувати капітальний ремонт комутаційного апарату. Це обумовлено в першу чергу тим, що дугогасне середовище – трансформаторне масло підлягає заміні, так як воно втрачає свої ізоляційні і дугогасні властивості.

Ще одна важлива характеристика – це вага вимикачів. Якщо розглядати, наприклад, різні типи вимикачів на напругу 110 кВ, то елегазовий і вакуумний навіть при більш покращених експлуатаційних характеристиках мають у кілька разів менший габаритний розмір, ніж масляні. Наприклад, масляний

вимикач МКП-110 має вагу майже 17 т, у той час як елегазовий вимикач 3AP1DT-126 фірми Siemens має вагу всього 3,6 т, при цьому габаритні розміри елегазового [6] вимикача в кілька разів менші масляного.

Дуже важливим питанням є експлуатація високовольтних вимикачів, їх обслуговування – проведення періодичних капітальних та поточних ремонтів, а також позапланових (аварійних) ремонтів. Вакуумний вимикач не вимагає обслуговування дугогасної та контактної частини, в цілому він має більш просту конструкцію, порівняно з іншими вимикачами, тому його обслуговувати досить легко і для цього не потрібне застосування спеціалізованого обладнання та інструменту. Елегазовий вимикач має складнішу конструкцію, але проведення періодичних технічних обслуговувань не викликає труднощів, обсяг роботи не перевищує обсяг робіт із вакуумним вимикачем. При зниженні тиску елегазу, необхідно зробити його докачування. Ремонт масляного вимикача передбачає значно більший обсяг робіт. Капітальний ремонт необхідно проводити кожні сім відключень струмів короткого замикання.

В електроустановках питанню пожежної безпеки приділяється чимало уваги. Що стосується високовольтних вимикачів, то масляні є найнебезпечнішими з точки зору пожежної безпеки, тому що в них міститься деяка кількість трансформаторного масла – легкозаймистої рідини. У розподільних пристроях з масляними вимикачами висувуються підвищені вимоги пожежної безпеки. Елегазові та вакуумні вимикачі абсолютно безпечні, оскільки конструктивно вони не мають легкозаймистих рідин та матеріалів.

Питання впливу обладнання електроустановок на навколишнє середовище також дуже актуальне. Для захисту навколишнього середовища необхідно мінімізувати кількість шкідливих речовин, що потрапляє до навколишнього середовища. В даному випадку масляні вимикачі мають найбільш згубний вплив на навколишнє середовище. Трансформаторна олія, що міститься в баках цих вимикачів, нерідко потрапляє в ґрунт через порушення герметичності баків, а також у разі виникнення аварійної ситуації, що супроводжується викидом олії з бака. Елегазові вимикачі відносно нешкідливі для навколишнього середовища, оскільки в процесі експлуатації вони не виділяють шкідливі речовини в навколишнє середовище. Єдине, на що слід звернути увагу – це елегаз (ізолююче і дугогасне середовище вимикача). Цей газ є небезпечним для навколишнього середовища. Але у зв'язку з тим, що технічно справний елегазовий вимикач, що періодично обслуговується, має малий відсоток витоків елегазу, можна вважати, що такий вимикач шкоди навколишньому середовищу не завдає. Виняток становлять випадки, коли через пошкодження бака вимикача елегаз повністю виходить із бака в атмосферу [5, 6]. Вакуумний вимикач з точки зору екології, є найбезпечнішим, тому що він не містить жодних шкідливих речовин, його робоче дугогасильне середовище – вакуум, тобто відсутність будь-яких газів або рідин.

Таблиця

Порівняльна характеристика повітряного, масляного, вакуумного та елегазового вимикачів

Тип вимикача	Безпека при експлуатації	Безпека щодо навколишнього середовища	Обслуговування	Чутливість до впливу навколишнього середовища	Зносостійкість	Розміри
Повітряний	Вибухонебезпечний	Безпечний	Часта заміна дугогасних контактів, періодичне технічне обслуговування механізму управління	Вплив температури навколишнього середовища, необхідність у додаткових установках	Середня	Установка, що вимагає великих відстаней
Масляний	Ризик виникнення пожежі або вибуху	Екологічно небезпечний	Періодична заміна олії (необоротна деградація олії при кожному відключенні)	Властивості середовища відключення можуть погіршуватися під впливом факторів навколишнього середовища (вологість, пил тощо)	Посередня	Відносно великі розміри пристрою
Вакуумний	Немає ризику виникнення вибуху або зовнішніх проявів	Відсутність забруднення навколишнього середовища	Масило механізмів керування в мінімальному обсязі	Нечутливі: повністю запаена герметична камера	Висока	Не габаритні
Елегазовий	Немає ризику виникнення вибуху або зовнішніх проявів	При утилізації або витоку екологічно небезпечний	Змащення механізмів керування в мінімальному обсязі	Нечутливі: повністю запаена герметична камера	Висока	Невеликі

В таблиці наведена порівняльна характеристика різних типів вимикачів.

Висновки. Порівняльний аналіз високовольтних вимикачів показав, що найбільш ефективними, якісними, надійними є елегазові та вакуумні високовольтні вимикачі. Провідні виробники комутаційних апаратів даного типу з кожним роком дедалі більше удосконалюють продукцію, роблячи її надійнішою та ефективнішою. Тому в наш час масляні вимикачі практично не випускаються. При будівництві нових об'єктів та технічному переоснащенні старих, віддається перевага виключно елегазовим та вакуумним високовольтним вимикачам. Тільки такі вимикачі здатні забезпечити високу надійність електропостачання споживачів та повною мірою забезпечити свої експлуатаційні характеристики, при цьому вони повністю відповідають нормам безпеки обслуговування, пожежної безпеки та екологічності.

Література

1. Клименко Б. В. Электричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс : навчальний посібник. – Х. : Точка, 2012. – 340 с. – ISBN 978-617-669-015-3.
2. Журавівський А. В., Казанський С. В., Матеєнко Ю. П. Надійність електроенергетичних систем і

електричних мереж – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 457 с.

3. Тарасевич П. Й. Перспективи розвитку засобів виявлення високовольтних вимикачів напругою 110–750 кВ, що відмовили. Електроенергетичні та електромеханічні системи. – Л. : Вид-во Нац. університету «Львівська політехніка» – 2009. – С. 91–96.
4. Романченко Ю. А., Петухов О. Г., Резнік І. О. Порівняльний аналіз різних типів високовольтних вимикачів. Майбутній науковець – 2021 : матеріали всеукр. наук.-практ. конф. з міжнар. участю. Сєверодонецьк: СНУ ім. В. Даля, 2021. – С. 160–162.
5. Михайлюк Р. І., Мисенко С. В., Кутін В. М., Рубаненко О. Є. Досвід та перспективи експлуатації елегазових вимикачів у Південно-Західній енергетичній системі. Енергетика та електрифікація. – 2014. – № 3. – С. 34–37.
6. Кутін В. М., Рубаненко О. Є., Мисенко С. В. Досвід впровадження та забезпечення надійності елегазових вимикачів в умовах експлуатації. Наукові праці ВНТУ. – 2013. – № 1. – С. 1–7.

References

1. Klymenko B. V. Elektrichni aparaty. Elektromehanichna aparatura komutatsii, keruvannya ta zahystu. Zagal'nyy kurs : navchal'nyy posibnyk. – H. : Tochka, 2012. – 340 s. – ISBN 978-617-669-015-3.
2. Zhurahiv's'kyj A. V., Kazans'kyj S. V., Matejenko Ju. P. Nadiijnist' elektroenergetychnyh system i elektrichnyh

- merzhyh – Kyi'v : KPI im. Igorja Sikors'kogo, 2017. – 457 s.
3. Tarasevych P. J. Perspektyvy rozvytku zasobiv vyjavlennja vysokovol'nyh vymykhiv napruhoju 110–750 kV, shho vidmovyly. Elektroenergetychni ta elektromehanichni systemy. – L. : Vyd-vo Nac. universytetu «L'vivs'ka politehnika» – 2009. – S. 91–96.
 4. Romanchenko Ju.A., Petuhov O. G., Rjeznik I. O. Porivnjal'nyj analiz riznyh typiv vysokovol'nyh vymykhiv. Majbutnij naukovec' – 2021 : materialy vseukr. nauk.-prakt. konf. z mizhnar. uchastju. Sjevjerodonec'k: SNU im. V. Dalja, 2021. – S. 160–162.
 5. Myhajljuk R. I., Mysenko S. V., Kutin V. M., Rubanenko O. Je. Dosvid ta perspektyvy ekspluatacii' elegazovyh vymykhiv u Pivdenno-Zahidnij energetychnij systemi. Energetyka ta elektryfikacija. – 2014. – № 3. – S. 34–37.
 6. Kutin V. M., Rubanenko O. Je., Mysenko S. V. Dosvid vprovadzhennja ta zabezpechennja nadijnosti elegazovyh vymykhiv v umovah ekspluatacii'. Naukovi praci VNTU. – 2013. – № 1. – S. 1–7.

Romanchenko J. Comparative analysis of high voltage switches of different types

The article presents a comparative analysis of the characteristics of air, oil, vacuum and sulfur hexafluoride high-voltage circuit breakers used on electrical substations. These high-voltage circuit breakers have rather complex structure controlled by electromagnetic, spring, hydraulic or pneumatic drives and they are divided into several types depending on the environment in which the arc is extinguished. The literature analysis has shown that air circuit breakers, as the least efficient, large in size and expensive to maintain, are practically not used at present, all old air circuit breakers are gradually being replaced by more efficient and reliable circuit breakers. Therefore, the article analyzes the characteristics of oil, vacuum and sulfur hexafluoride high-voltage circuit breakers. The advantages and disadvantages of work in various conditions of high-voltage circuit breakers are consid-

ered. The most important characteristics of high-voltage circuit breakers such as mechanical strength, electrical strength of the arc extinguishing medium, switching life of the circuit breaker – the number of cycles of the circuit breaker, the mass of the circuit breaker are compared. It is shown that an important issue is the operation of high-voltage circuit breakers, their maintenance - carrying out periodic capital and current repairs, as well as unscheduled (emergency) repairs. The issues of the impact of electrical equipment on the environment are considered. To protect the environment, it is necessary to minimize the amount of harmful substances released into the environment. A comparative analysis of high-voltage circuit breakers showed that the most efficient, high-quality, and reliable are sulfur hexafluoride and vacuum high-voltage circuit breakers. Leading manufacturers of switching devices of this type every year improve their products more and more, making them more reliable and efficient. Therefore, at present, oil circuit breakers are practically not produced. During the construction of new facilities and the technical re-equipment of old ones, only sulfur hexafluoride and vacuum high-voltage circuit breakers are preferred. Only such circuit breakers are able to provide high reliability of power supply to consumers and fully ensure their performance, fully complying with the standards of service safety, fire and environmental safety.

Key words: high-voltage circuit breaker, mechanical strength, electrical strength, arc extinguishing medium, vacuum, sulfur hexafluoride.

Романченко Юлія Андріївна – к.т.н., доцент кафедри електричної інженерії, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк), romanchenko_ja@snu.edu.ua

Стаття подана 28.01.2022 р.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-272-2-120-125>

УДК 681.5.015

ВИКОРИСТАННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСІВ ВИРОБНИЦТВА АМІАКУ

Куліков Д.О., Купіна О.А., Лорія М.Г., Целіщев О.Б.

USE OF A MATHEMATICAL MODEL FOR OPTIMIZATION OF DYNAMIC PARAMETERS OF AMMONIA PRODUCTION PROCESSES

Kulikov D.O., Kupina O.A., Loria M.G., Tselishchev O.B.

У роботі розглядається питання розробки математичної моделі, яку можна застосовувати як для оптимізації технологічного процесу, так і для автоматизованої системи регулювання. Переваги такого підходу наступні: він ґрунтується на об'єктивних даних, що формує сам об'єкт керування; достатньо проста реалізація такого підходу; отримання адекватної і точної математичної моделі.

Дослідження проводиться для оптимізації технологічного процесу та автоматизованої системи регулювання, що розглядається.

Адаптація моделі буде забезпечувати ефективність обох стратегій керування. Для досягнення оптимальної динамічної моделі вирішувалися наступні завдання:

- була розроблена інформаційно-логічну схему взаємозв'язків між параметрами технологічного процесу, що розглядається;

- складена математичні моделі газового реактору за концентрацією цільового компонента та за температурою.

Отримана динамічна модель дозволяє адекватно описати характер зміни параметрів у діапазоні, які значно перевищує регламентні границі. Це особливо важливо при застосуванні її в системах контролю безпеки реактора й технологічних тренажерах.

В результаті досліджень встановлено, що урахування в моделі процесу хімічної реакції дозволяє контролювати такий складний параметр як зміна активності каталізатора. Це характеристика здатності каталізатора прискорювати хімічну реакцію. Каталітична активність визначається як різниця між швидкостями однієї і тієї ж реакції в даних умовах за присутності каталізатора та без нього або як відношення цих швидкостей. Каталітична активність залежить від природи та кількості активних центрів, які беруть участь в каталітичному процесі. В ідеальному випадку, коли всі активні центри каталізатора беруть участь у каталізі, каталітична активність — максимальна кількість молекул, що прореагували на одному активному центрі за одиницю часу. Цей показник є дуже важливим при визначенні необхідності адаптації моделі. Адаптація моделі одночасно забезпечує її адекватність як у системі оптимізації, так і у авто-

матизованої системі регулювання. Що є суттєвою перевагою, бо дозволяє використовувати одну математичну модель в декількох випадках, що, в свою чергу, є більш доцільним з економічної точки зору.

Ключові слова: математична модель, адаптація моделі, реактор, автоматизована система регулювання, оптимізація.

Вступ. Аміак є одним з основних продуктів хімічної промисловості, виробництво якого складає мільйони тон на рік і відноситься до великотоннажних хімічних виробництв. Технологія синтезу аміаку з елементів є сучасним методом фіксації атмосферного азоту, що покликана забезпечити потреби людства у азотовмісних сполуках. У зв'язку з цим аміак є основною проміжною сировиною для одержання практично усіх інших продуктів зв'язаного азоту, до найбільш поширених з яких відносяться азотна кислота, її солі і добрива. У світовій практиці 80 % від загального обсягу виробництва аміаку використовується у виробництві мінеральних добрив. Аміак також широко використовується для синтезу таких важливіших полімерних матеріалів, як поліаміди, поліуретани, поліакрилонітрил та інші. Шляхом нітрування азотною кислотою різних органічних речовин (толуолу, фенолу, бензолу, целюлози, гліцерину) одержують їх нітропохідні, які використовуються як вибухові речовини (нітробензол, тротил, піроксилін, амоніти), а також напівпродукти для синтезу барвників (наприклад аніліну).

Актуальність.

У зв'язку з великим попитом людства в продуктах зв'язаного азоту (особливо азотних добрив) світове виробництво аміаку за об'ємами поступаєтьс тільки виробництву сірчаної кислоти і кисню. Є три основні технології отримання аміаку: під низьким тиском, під середнім тиском та під високим

тиском. Діапазон тисків для синтезу аміаку становить (12-34) МПа. Найбільш розповсюдженою схемою отримання аміаку в Україні являється схема під середнім тиском (порядку 30 МПа). Основні потужності існуючих виробництв нашої країни являються 600 т/добу, 1360 т/добу та 1700 т/добу. На даному етапі світовий розвиток промисловості синтезу аміаку має ряд пропозицій для його реалізації. Синтез аміаку проводять в основному 7 на установках потужністю 1360-1500 т/добу; окремі агрегати мають потужність 2000 т/добу, проектується агрегати потужністю 3000 т/добу. В експлуатації знаходяться також побудовані раніше установки потужністю Синтез аміаку – один із широко застосовуваних у промисловості способів переробки вуглеводневої сировини й зокрема природного газу. [1].

Важливою проблемою промислового виробництва аміаку є підвищення технологічної та економічної ефективності цього процесу. Поряд з методами розв'язання цієї проблеми за рахунок впровадження нових каталізаторів та вдосконалювання конструкцій реакторного обладнання, широко застосовується оптимізація технологічних параметрів процесу синтезу аміаку.

Окреме місце займає задача ефективного регулювання процесом та вироблення оптимальної стратегії зміни технологічних параметрів. Розв'язання цієї задачі вимагає розробку математичної моделі, яка відображає динаміку процесу з високою ступеню адекватності в широкому діапазоні зміни параметрів.

Мета роботи. Мета роботи – Отримати динамічну модель, яка дозволяє адекватно описати характер зміни параметрів в певному діапазоні відділення, адаптація якої одночасно забезпечує її

адекватність як у системі оптимізації, так і у автоматизованій системі регулювання.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання:

- розробити інформаційно-логічну схему взаємозв'язків між параметрами технологічного процесу, що розглядається;

- скласти математичні моделі газового реактору за концентрацією цільового компонента та за температурою.

Аналіз досліджень і публікацій. Результати досліджень. Процес синтезу аміаку проводиться за циркуляційною схемою, що дозволяє досягати значної ступені конверсії синтез-газу. Основою технологічної схеми є реактор поличного типу з байпасом «холодного» газу. На рис. 1 наведена схема такого реактора.

Виробництво аміаку відрізняється відносно високою складністю й різноманіттям параметрів, що впливають на хід процесу, складною кінетикою хімічних реакцій, розподіленістю і нелінійністю параметрів процесу як об'єкта моделювання. Існуюче виробництво є високо автоматизованим, однак керування процесом ведеться за алгоритмами, які не враховують зміни параметрів реактора у часі.

У зв'язку із цим постає питання розробки математичної моделі (ММ), яка була би застосовуваною як для оптимізації технологічного процесу, так і для автоматизованої системи регулювання. У цьому випадку адаптація моделі буде забезпечувати ефективність обох стратегій управління. Крім того, динамічну модель можна застосовувати у системи навчання і тренування обслуговуючого персоналу, а також підвищення безпеки роботи реактора. [2-4]

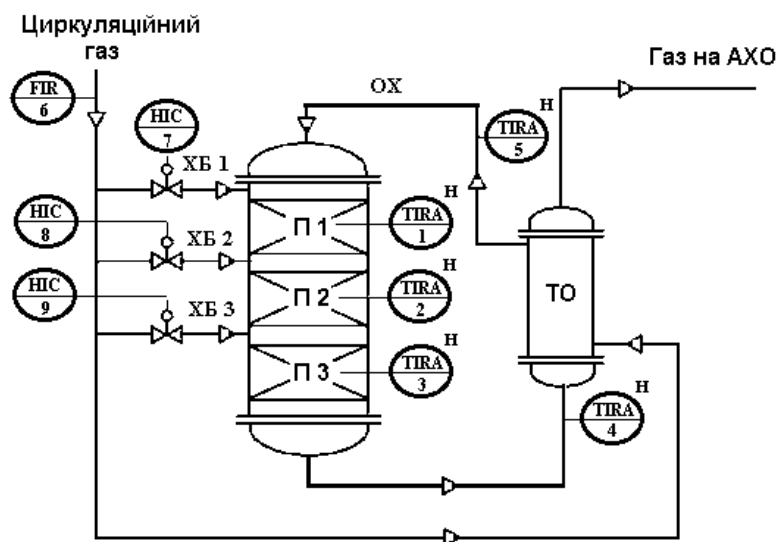


Рис. 1. Схема багато поличного газового реактора із вбудованим теплообмінником

ТО – теплообмінник; П1, П2, П3 – перша, друга і третя полиці із каталізатором; ОХ - потік основного ходу синтез - газу;

ХБ1, ХБ2, ХБ3 – потоки «холодних» байпасів синтез - газу на відповідні полки реактора; АХО – аміачно-холодильне відділення; TIRA 1-6 - прилади контролю температури; FIR - 7 – прилад контролю витрати синтез - газу;

НІС 8-10 – панелі дистанційного керування електричними засувками

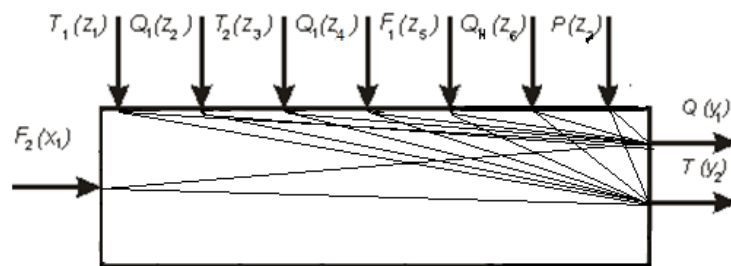


Рис. 2. Інформаційно-логічна схема полиці колони синтезу аміаку

Наявність великої кількості складного хіміко-технологічних обладнання і різноманітних процесів суттєво ускладнює моделювання всього комплексу в цілому. Тому логічно почати з формування динамічної моделі газового реактора, у якому й відбуваються основні процеси синтезу аміаку. Хімічні процеси, що відбуваються в реакторі, також характеризуються великим ступенем складності, тому задача розробки математичної моделі всіх основних процесів з урахуванням їх динаміки є суттєво нетривіальною.

Створення моделі складного фізико-хімічного процесу є, як правило, ітераційним процесом, коли функціонування розроблюваної математичної моделі постійно зрівнюється з параметрами реального процесу й відповідно корегується. [5,6]

При цьому необхідне застосування знань із різних наукових областей, зокрема, необхідно враховувати:

- фізичні закони збереження речовини, енергії і імпульсу;
- термодинамічні властивості речовин;
- хімічні механізми і кінетику реакцій.

У реакторі, що розглядається, тиск стабілізується роботою компресора синтез-газу. Тому, тиск не є регульованою величиною, а може бути віднесений до збурюючого фактору. При керуванні газовими реакторами достатньо регулювати температуру, а концентрацію можна оцінити використовуючи математичну модель процесу. Регулюючим параметром для кожної полки є витрата синтез-газу за «холодним» байпасом.

Всі інші параметри процесу є збурюючими координатами. До них слід віднести температури вхідних потоків T_1 та T_2 та концентрації Q_1 та Q_2 у них цільового компоненту. Інформаційно-логічна схема газового реактора наведена на рис. 2.

Також слід відміти, що вихідні координати газового реактора є взаємопов'язаними. Так, наприклад, зміна температури T в реакторі з одного боку відповідно до закону Ле Шательє змінить кількість речовини, що утворюється, тобто викличе зміну концентрації Q . З цього випливає, що зміна будь-якої з вхідних координат (регулюючої або збурюючої) викличе зміну відразу всіх вихідних координат.

Для визначення ММ газового реактора слід скласти дві часткові моделі: за концентрацією Q

цільового компоненту та за температурою T . Складемо ці часткові ММ.

Розглянемо складання часткової ММ за концентрацією Q аміаку, що утворюється в реакції (цільового компоненту). Складемо рівняння матеріального балансу за цільовим компонентом (компонентом, що утворюється в реакції). Цільовий компонент надходить в реактор із першим та з другим потоком (наприклад, у технологічних схемах із рециклом), утворюється в реакторі в наслідок реакції, накопичується в реакторі та відводиться з потоком, який виходить, із реактора.

Рівняння матеріального балансу за цільовим компонентом має вигляд.

$$dm_1 + dm_2 + dm_p = dm_v + dm, \quad (1)$$

де $dm_1 = F_1 Q_1 dt$ – маса цільового компоненту, що потрапляє в реактор із першим потоком; $dm_2 = F_2 Q_2 dt$ – маса цільового компоненту, що потрапляє в реактор із другим потоком; $dm_p = \rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) (Q - Q_n) \frac{P}{P_0} dt$ – маса цільового компоненту, що утворюється в реакції; $dm_v = \rho V dQ$ – маса цільового компоненту, яка накопичується в реакторі об'ємом V ; $dm = (F_1 + F_2) Q dt$ – маса цільового компоненту, що відводиться з реактора.

В рівнянні (1) F_1 – витрата потоку першого реагенту, $\frac{\kappa\mathcal{Z}}{c}$; F_2 – витрата потоку другого реагенту,

$\frac{\kappa\mathcal{Z}}{c}$; ρ – густина газової суміші в реакторі (визначається з рівняння Менделєєва-Клапейрона), $\frac{\kappa\mathcal{Z}}{M^3}$;

V – вільний об'єм газового реактора, M^3 ; K – швидкість хімічної реакції, $\frac{1}{c}$; Q_1 , Q_2 , та Q – концентрація цільового компоненту на входах та на виході з реактора відповідно, мас. частка; T – температура у реакторі, K ; R – універсальна газова стала, $\frac{Дж}{\text{моль} \cdot K}$; E – енергія активації, $\frac{Дж}{\text{моль}}$.

Рівняння матеріального балансу в технологічних змінних набуде вигляду

$$F_1 Q_1 dt + F_2 Q_2 dt + \rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)(Q - Q_n) \frac{P}{P_0} dt = \rho V dQ + (F_1 + F_2) Q dt \quad (2)$$

Після лінеаризації, вилучення рівняння статистики та переходу до безрозмірних координат

$$\left(\frac{\Delta Q}{Q_0} = y_1; \quad \frac{\Delta T}{T_0} = y_2; \quad \frac{\Delta P}{P_0} = y_3; \quad \frac{\Delta F_1}{F_{10}} = x_1; \quad \frac{\Delta F}{F_0} = \frac{\Delta S}{S_0} = x_2; \quad \frac{\Delta T_1}{T_{10}} = z_1; \quad \frac{\Delta Q_1}{Q_{10}} = z_2; \quad \frac{\Delta T_2}{T_{20}} = z_3; \quad \frac{\Delta Q_2}{Q_{20}} = z_4; \quad \frac{\Delta F_2}{F_{20}} = z_5; \quad \frac{\Delta Q_n}{Q_{n0}} = z_6; \quad \frac{\Delta P}{P_0} = z_7\right), \text{ отримуюмо рівняння:}$$

$$\tau_1 \frac{dy_1}{dt} + y_1 = K_{11}x_1 + K_{12}z_2 + K_{13}z_4 + K_{14}z_5 + K_{15}z_6 + K_{16}y_2 \quad (3)$$

де $\tau_1 = \frac{\rho V Q_0}{\Pi_1}$ – стала часу, c ;

$$\Pi_1 = Q_1 \left[F_1 + F_2 - \rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)(Q - Q_n) \frac{P}{P_0} \right];$$

$$K_{11} = \frac{(Q - Q_2)F_{20}}{\Pi_1} - \text{коефіцієнт}; \quad K_{12} = -\frac{Q_1 F_1}{\Pi_1};$$

$$K_{13} = -K_{14} = -\frac{Q_2 F_2}{\Pi_1}; \quad K_{15} = \frac{\rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) Q_n}{\Pi_1} \frac{P}{P_0} - \text{коефіцієнт};$$

$$K_{16} = \frac{\frac{E}{RT_0} \rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right)(Q - Q_n)}{\Pi_1} \frac{P}{P_0} - \text{коефіцієнт.}$$

Рівняння (3) є частковою динамічною ММ газового реактора за концентрацією цільового компонента без урахування часу запізнення. [7,8]

Для того щоб розробити часткову математичну модель газового реактора за температурою, слід скласти рівняння теплового балансу. Тепло в реактор надходить із потоками реагентів, виділяється у процесі реакції. Це тепло накопичується в об'ємі реактора та виходить із нього з потоком $F_1 + F_2$. При розрахунку ММ вважатимемо, що втрата тепла у навколишнє середовище незначна та нею можна нехтувати. Отже рівняння теплового балансу матиме вигляд:

$$dq_1 + dq_2 + dq_p = dq_v + dq, \quad (4)$$

де $dq_1 = F_1 c_1 T_1 dt$ – кількість тепла, що надходить із першим потоком; $dq_2 = F_2 c_2 T_2 dt$ – кількість тепла, що надходить із другим потоком; $dq_p = r \rho V K (Q - Q_n) \frac{P}{P_0} dt$ – кількість тепла, що

виділяється в наслідок реакції; $dq_v = \rho V c dT$ – кількість тепла, що накопичується у реакторі; $dq = (F_1 + F_2) c T dt$ – кількість тепла, що виходить із реактора.

В рівнянні (4): c_1, c_2, c – теплоємність вхідних та вихідного потоку, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$; T_1, T_2, T – температура вхідних та вихідного потоку, К ; r – питома теплота реакції, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$; dT – зміна температури у реакторі, К .

Після лінеаризації, вилучення рівняння статистики та переходу до безрозмірного вигляду маємо:

$$\tau_2 \frac{dy_2}{dt} + y_2 = K_{21}x_1 + K_{22}z_1 + K_{23}z_3 + K_{24}z_5 + K_{25}z_6 + K_{26}z_7 + K_{27}y_1 \quad (5)$$

де $\tau_2 = \frac{\rho V c T_0}{\Pi_2}$ – стала часу, c ;

$$\Pi_2 = \left[(F_{10} + F_{20}) c T_0 - \frac{E}{RT_0} r \rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) \right];$$

$$(Q_0 - Q_{n0}) \frac{P}{P_0}$$

$$K_{21} = \frac{(c_2 T_{20} - c T_0) F_{20}}{\Pi_2} - \text{коефіцієнт};$$

$$K_{22} = \frac{F_{10} c_1 T_{10}}{\Pi_2} - \text{коефіцієнт}; \quad K_{23} = \frac{F_{20} c_2 T_{20}}{\Pi_2} -$$

$$\text{коефіцієнт}; \quad K_{24} = \frac{F_{10} (c_1 T_{10} - c T_0)}{\Pi_2} - \text{коефіцієнт};$$

$$K_{25} = -\frac{r \rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) Q_{n0} \frac{P}{P_0}}{\Pi_2} - \text{коефіцієнт};$$

$$K_{26} = \frac{r \rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) (Q_0 - Q_{n0}) \frac{P}{P_0}}{\Pi_2} -$$

$$\text{коефіцієнт}; \quad K_{27} = \frac{r \rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) Q_0 \frac{P}{P_0}}{\Pi_2} -$$

коефіцієнт.

Рівняння (5) є частковою динамічною математичною моделлю газового реактора за температурою.

Аналізуючи отримані часткові ММ газового реактора, слід зробити висновок, що вихідні координати є взаємозалежними. Рівняння (3) та (5) утворюють систему рівнянь. Для того, щоб виключити залежність однієї вихідної координати від інших, слід розв'язати систему рівнянь (6).

$$\begin{cases} \tau_1 \frac{dy_1}{dt} + y_1 = K_{11}x_1 + K_{12}z_2 + K_{13}z_4 + K_{14}z_5 + \\ + K_{15}z_6 + K_{16}y_2 \\ \tau_2 \frac{dy_2}{dt} + y_2 = K_{21}x_1 + K_{22}z_1 + K_{23}z_3 + K_{24}z_5 + \\ + K_{25}z_6 + K_{26}z_7 + K_{27}y_1 \end{cases} \quad (6)$$

Система рівнянь (6) може бути розв'язана будь-яким методом. Це можна зробити використовуючи, наприклад, матричний метод розв'язання системи рівнянь, як це було показано раніше.

Аналогічним чином складаються системи рівнянь для другої та третьої полиць реактора. Ці три системи рівнянь сумісно з математичною моделлю внутрішнього теплообмінника, який являє собою кожухотрубчастий теплообмінник (вивід динамічної математичної моделі наведений в [5]), складають математичну модель колони синтезу аміаку у виробництві аміаку.

Висновок. Отримана динамічна модель дозволяє адекватно описати характер зміни параметрів у діапазоні, якій значно перевищує регламентні межі. Це особливо важливо при застосуванні її у системах контролю безпеки реактора та технологічних тренажерах. Урахування в моделі процесу хімічної реакції дозволяє контролювати такий складний параметр як зміна активності каталізатора. Цей показник є дуже важливим при визначенні необхідності адаптації моделі. Адаптація моделі одночасно забезпечує її адекватність як у системі оптимізації, так і у автоматизованій системі регулювання.

Література

1. Амелин А.Г. Общая химическая технология [Текст] / А.Г.Амелин, А.М.Кутепов – М.: Химия, 1977. – 324 с.
2. Стенцель Й.І. Автоматизація технологічних процесів хімічних виробництв: Підручник [Текст] / Й.І. Стенцель, О.В. Поркуян - Луганськ: вид-во Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля, 2010. – 300 с.
3. Математичне моделювання технологічних об'єктів [Текст] : Підручник / О.Б.Целищев, П.Й.Елісєєв, М.Г.Лорія, І.І.Захаров – Луганськ. Вид-во Східноукр. нац. унів. ім. В. Даля, 2011. – 421 с.
4. Принципы математического моделирования химико-технологических систем [Текст] / В.В.Кафаров, В.Л.Перов, В.П.Мешалкин и др. – М.: Химия, 1974. – 344 с.
5. Spatial Self-Organization in One Process of Chemical Technology [Text] : International Conference on

Differential Equations and Dynamical Systems., 1-4 August 1997. Canada. Waterloo : 1997. – P. 166.

6. Thermal Spots in an Industrial Packed Bed Catalytic Reactor [Text] : Year 2000 International Conference on Dynamical Systems and Differential Equations (ICDSDE) Abstracts Book. USA, Kennesaw, 2000. – P.81.
7. Абдалхамид, Д. Система екстремального управління многополочным реактором с моделью [Текст] / Д.Абдалхамид, М.Г.Лорія, А.Б.Целищев, П.И.Елисеев // Вісник ЧНУ. - 2012. - №15(186). - ч.2. - С.152-156.

References

1. Amelin A.G., General chemical technology. (1977). Moscow, USSR:Higher school, 448с.
2. Stentsel Y.I., (2010). *Avtomatyzatsiia tekhnologichnykh protsesiv khimichnykh vyrobnytstv, Pidruchnyk* [Automation of technological processes of chemical production, Textbook], Luhansk, vyd-vo Skhidnoukr. nats. uh-tu im. V. Dalia, , 300 p.
3. Tselishchev O.B. (2011), *Matematychni modelyuvannia tekhnologichnykh obektiv* [Mathematical modeling of technological objects], Luhansk. Vyd-vo Skhidnoukr. nats. uh-tu im. V. Dalia, 421 p.
4. Kafarov V.V., (1974).Principles of mathematical design of the chemical-technological systems. Moscow, USSR:Chemistry,. 344 p.
5. Spatial Self-Organization in One Process of Chemical Technology [Text] : International Conference on Differential Equations and Dynamical Systems., 1-4 August 1997. Canada. Waterloo : 1997. – P. 166.
6. Thermal Spots in an Industrial Packed Bed Catalytic Reactor [Text] : Year 2000 International Conference on Dynamical Systems and Differential Equations (ICDSDE) Abstracts Book. USA, Kennesaw, 2000. – P.81.
7. D.Abdalhamid, (2012).System extreme management by a multiself of Reactor with the model / D.Abdalhamid, Loria M.G., Tselishchev O.B., Yeliseiev P.Y., // Visnik SNU. - №15(186). - p.2. p.152-156p.

Kulikov D.O., Kupina O.A., Loria M.G., Tselishchev O.B. Us of a mathematical model for optimization of the dynamic parameters of ammonia production processes .

The work deals with the development of a mathematical model that can be used both for the optimization of the technological process and for the automated regulation system. The advantages of this approach are as follows: it is based on objective data that forms the control object itself; the implementation of such an approach is quite simple; obtaining an adequate and accurate mathematical model.

The study is conducted to optimize the technological process and the automated control system under consideration.

Adaptation of the model will ensure the effectiveness of both management strategies. To achieve the optimal dynamic model, the following tasks were solved:

- an informational and logical scheme of relationships between the parameters of the technological process under consideration was developed;

- mathematical models of the gas reactor based on the concentration of the target component and temperature were compiled.

The obtained dynamic model allows to adequately describe the nature of the change of parameters in a range that significantly exceeds the regulatory limits. This is especially important when it is used in reactor safety control systems and technological simulators.

As a result of research, it was established that taking into account the chemical reaction process in the model allows controlling such a complex parameter as the change in catalyst activity. This is a characteristic of the catalyst's ability to accelerate a chemical reaction. Catalytic activity is defined as the difference between the rates of the same reaction under the given conditions in the presence of a catalyst and without it, or as the ratio of these rates. Catalytic activity depends on the nature and number of active centers involved in the catalytic process. In the ideal case, when all active centers of the catalyst participate in catalysis, the catalytic activity is the maximum number of molecules that reacted on one active center per unit of time. This indicator is very important when determining the necessity of adapting the model. The adaptation of the model simultaneously ensures its adequacy both in the optimization system and in the automated regulation system. Which is a significant advantage, because it allows you to use one mathematical model in several cases, which, in turn, is more expedient from an economic point of view.

Keywords: *mathematical model, model adaptation, reactor, automated control system, optimization.*

Куліков Д.О. – аспірант кафедри «Комп'ютерно-інтегрованих систем управління» Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: kulikov@ukr.net

Купіна О.А. – аспірант кафедри «Комп'ютерно-інтегрованих систем управління» Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: kupina@snu.edu.ua

Лорія М.Г. – д.т.н., професор, в.о. завідувача кафедри «Комп'ютерно-інтегрованих систем управління» Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: m_loria@snu.edu.ua.

Целіщев О. Б. – д.т.н., професор, проректор з наукової роботи Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: atp00@ukr.net.

Стаття подана 11.03.2022

ЕКОНОМІЧНІ НАУКИ

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-272-2-126-135>

УДК 339.138:334.72

ФОРМУВАННЯ Й РЕАЛІЗАЦІЯ ІННОВАЦІЙНОЇ МАРКЕТИНГОВОЇ ПОЛІТИКИ ПІДПРИЄМСТВА

Гаврюшенко Г.В.

FORMATION AND IMPLEMENTATION OF THE INNOVATIVE MARKETING POLICY OF THE ENTERPRISE

Havriushenko H.V.

У статті наголошено на тому, що маркетинг за своїм сутнісним змістом є теоретичною концепцією, що сприяє пристосуванню суб'єктів виробництва до роботи в умовах ринкової економіки. Маркетинг – це діяльність підприємств і закупівельних організацій в інтересах їх споживачів. Маркетинг передбачає задоволення потреб клієнта з вигодою для підприємства (фірми). Наголошено, що потаєне формування маркетингової політики передбачає: здійснення аналітичної діагностики підприємства та стратегічне передбачення (прогнозування) його розвитку; розробку комплексу маркетингу; забезпечення ефективної організації та дієвого управління маркетингом; формування економічно обґрунтованого бюджету маркетингу, контролю та оцінки маркетингової діяльності, що є платформою для прийняття управлінських рішень. Показано, що для підвищення ефективності діяльності підприємствам слід запроваджувати інноваційний маркетинг. Маркетингові інновації – це запровадження нового методу маркетингу, що передбачає значні зміни у дизайні чи упаковці товару, розміщенні товару, просуванні товару чи ціноутворенні. Наголошено, що для ефективної реалізації інноваційної маркетингової політики підприємствам необхідно впроваджувати маркетингову стратегію та проводити маркетингові дослідження щодо застосування новітніх методичних прийомів: опитування, спостереження, метод експертних оцінок та фокус-групи. Наголошено, що основою інноваційної маркетингової політики будь-якого підприємства є стратегія ціноутворення. Вибір правильної цінової стратегії – вершина стратегії розвитку підприємства. Відзначено, що існує дві протилежні цінові стратегії для встановлення ціни на новий продукт: цінова політика «зняття вершиків»: встановлення навмисно завищеної ціни на новий товар, що необхідно для отримання надприбутку, що в короткі терміни окупає інвестиції, витрачені на розробку, виробництво та виведення товару на ринок, і цінова стратегія «проникнення на ринок», що полягає у встановленні навмисно заниженої ціни новий товар. Підкреслено, що поряд із загальними

(традиційними) стратегіями ціноутворення для нового продукту та для продукту, що вже тривалий час існує на ринку, фірмам слід розглядати інноваційні стратегії ціноутворення, а саме: преміум-ціноутворення, в якому продавець встановлює високу ціну протягом усього життєвого циклу продукту. Наголошено на тому, що важливим шляхом удосконалення інноваційної маркетингової політики підприємства є оптимізація витрат на маркетинг та рекламу. Для реалізації цієї мети необхідно запровадити систему оперативного отримання інформації про ефективність як окремих маркетингових заходів, так і маркетингової діяльності загалом. Основними етапами оцінки роботи маркетологів при впровадженні інноваційної маркетингової політики підприємства є: постановка завдань, оцінка результатів та підготовка програми коригувальних заходів, що допоможуть виключити виявлені негативні сторони роботи маркетингової служби.

Ключові слова: маркетинг, маркетингова політика, маркетингова стратегія, маркетингова інновація, інноваційна маркетингова політика підприємства.

Вступ. Ключовою метою будь-якого підприємства є отримання прибутку. Досягнення цієї мети можливе за рахунок дієвої маркетингової політики, ключовим завданням якої є дослідження ринкового середовища, а саме – стану попиту, пропозиції, конкурентів, внутрішнього та зовнішнього середовища підприємства.

На теперішній час не викликає сумнівів той факт, що для забезпечення конкурентоспроможності сучасне підприємство повинно «йти в ногу із сучасним світом», тобто використовувати інновації, залучати нові технології і виготовляти новий продукт, який повинен бути кращим, ніж у конкурентів, щоб займати провідне місце на ринку [1]. Саме нові то-

вари створюють прорив на ринку та розширюють його, приносять прибуток, підсилюють увагу споживача та виділяють серед конкурентів.

Постановка проблеми. Для підвищення ефективності своєї діяльності підприємствам слід впроваджувати інноваційний маркетинг, що орієнтований на безперервне удосконалення продуктів та послуг. Інноваційний маркетинг передбачає, що підприємство повинно безперервно удосконалювати свої продукти, а також розробляти стратегії, форми й методи їх просування та збуту. Інноваційні методи маркетингу необхідні фірмам для збільшення продажів і прибутковості. Маркетингові інновації – це можливості фірми ефективно реагувати на потреби ринку, розробляючи нову маркетингову концепцію або нову маркетингову стратегію для досягнення успіху на ринку.

Маркетингова політика підприємства являє собою «перелік ідей», який формує опис стратегічних та інших дій, рамок ведення бізнесу задля досягнення цілей маркетингу.

Маркетингові інновації можуть бути конкурентною перевагою, оскільки вони дозволяють фірмам просувати свою продукцію краще, ніж у конкурентів. З іншого боку, маркетингові інновації – це стратегічний вибір кожної фірми, бо вимагає від неї виділення значних фінансових ресурсів.

Аналіз досліджень та публікацій. Проблеми впровадження маркетингових інновацій були пріоритетними у дослідженнях таких вітчизняних і зарубіжних фахівців: В.П. Александрової, І. Ансоффа, Ю.М. Бажала, А.М. Бірмана, В.І. Бокія, О.Д. Василика, Л. Водачека, А.С. Гальчинського, В.М. Гейця, А.П. Гречан, А.В. Гриньова, А.І. Даниленка, М.Я. Дем'яненко, М.П. Денисенка, І.А. Ігнатієвої, В.С. Кабакова, М.М. Кирилова, М.Д. Корінька, О.О. Лапко, Н.І. Лапіна, І.В. Новікової, В.М. Опаріна, К.В. Павлюк, А.А. Переседи, П.Т. Саблука, І.О. Тарасенко, В.М. Федосова, М.Г. Чумаченка, Ю.Є. Шенгера, Й. Шумпетера, С.І. Юрія, Ю.В. Яковця та інших. Постулати інноваційного маркетингу представлені в наукових працях Д. Воркса, К. Вотсон-Хемфілла, М. Джорджа, П. Друкера, Р. Каплана, Д. Нортон, М. Портера, К. Прахалада, А. Сливогоцького, Г. Стефіка та Б. Стефік, Х. Фрімана, Г. Хамела. Разом із тим, слід зазначити, що маркетингові інновації виникають постійно, що актуалізує вибір теми дослідження, визначає його мету, завдання та логіку подання матеріалу.

Мета статті полягає у теоретичному обґрунтуванні методики формування й реалізації інноваційної маркетингової політики підприємства.

Результати досліджень. Серед вітчизняних маркетингологів словосполучення «маркетингова політика» використовується дуже часто, однак його конкретний зміст не розкривається, крім того, кожен науковець по-своєму трактує це поняття. Маємо наголосити, що на теперішній час існує більше 2000 визначень поняття «маркетинг». Така різноманіт-

ність обумовлена, перш за все тим, на які основоположні аспекти маркетингу робиться акцент у визначеннях, як запропоновані формулювання пов'язані з конкретними видами маркетингу, сферами його застосування. Слід констатувати, що всі визначення носять нечіткий характер. У той же час знаходження єдиного визначення не може бути самоціллю, бо це могло би перешкодити подальшому розвитку сутності поняття.

Принципова відмінність між звичайним збутом і маркетингом полягає в тому, що для збуту найважливіше – це за будь-яких умов реалізувати створений товар, а для маркетингу – задовольнити потреби споживачів і підпорядкувати їм виробництво. Один із провідних мислителів у літературі з менеджменту Пітер Друкер так висловив свою інтерпретацію маркетингу: «Маркетинг означає погляд на бізнес очима покупця». Справжня мета маркетингу – позбавити необхідності продавати. Ціль полягає в тому, щоб настільки добре зрозуміти клієнта і його потреби, щоб продукт, створений на його основі, точно підходив і, отже, продавався сам» [2].

Філіп Котлер під маркетингом розуміє вид людської діяльності, спрямованої на задоволення потреб шляхом обміну.

Найбільш сучасний погляд на те, що таке «маркетинг», має Американська маркетингова асоціація, яка надає наступне визначення: «Маркетинг – це діяльність, набір інститутів та процесів для створення, спілкування, доставки та обміну пропозиціями, що мають цінність для клієнтів, партнерів та суспільства в цілому» [2].

Як правило, маркетинг, розглядається у двох аспектах: у широкому та вузькому розумінні. Маркетинг – згідно до його широкого розуміння – це соціально-управлінський процес, за допомогою якого індивідууми і групи людей шляхом створення продуктів і їх обміну отримують те, в чому мають потребу. Отже, маркетинг – це своєрідна філософія управління і такі напрями її реалізації, коли вирішення проблем споживачів (клієнтів) шляхом ефективного задоволення їх запитів призводить до успіху підприємства і приносить користь суспільству.

У вузькому розумінні (на рівні окремих суб'єктів господарювання) маркетинг визначається як цілісна система, що призначена для планування асортименту та обсягів виробленої продукції, визначення цін, розподілу продуктів між обраними ринками і стимулювання збуту, щоб досягнуте при цьому різноманіття благ призводило до задоволення інтересів як виробників, так і споживачів. Дане визначення, в основу якого покладено концепцію «4Р», має досить широкий зміст, бо охоплює діяльність і некомерційних організацій. Таким чином, маркетинг – це діяльність підприємств та організацій в інтересах їх споживачів. Маркетинг – задоволення потреб клієнта з вигодою для себе. Хто краще задовольняє потреби клієнта, той робить найкращий бізнес. А задовольняє ці потреби краще той, хто ці потреби краще знає. І найкраще знає свого клієнта.

Лев Толстой говорив, що автору необхідно «носити взуття своїх героїв, виряджати в шкуру своїх персонажів». Це стосується і маркетолога з його персонажами-клієнтами [3].

Вітчизняні підприємства можуть використовувати три рівні маркетингової діяльності: I рівень – діяльність підприємства на основі маркетингової концепції, що передбачає зміну всієї філософії управління підприємством; II рівень – підприємст-

вом використовуються окремі комплекси взаємозв'язку методів і засобів маркетингової діяльності (створення служби маркетингу); III рівень – на підприємстві ізольовано реалізуються окремі елементи маркетингу [4].

Маркетингова політика будь-якого підприємства передбачає цінову, товарну, збутову сфери та комплекс заходів щодо просування продукції на ринку (рис. 1).



Рис. 1. Структура маркетингової політики підприємства



Рис. 2. Поетапне формування маркетингової політики

Поетапне формування маркетингової політики передбачає:

- ✓ здійснення аналітичної діагностики підприємства та стратегічного передбачення (прогнозування) його розвитку;
- ✓ розробку комплексу маркетингу;
- ✓ забезпечення ефективної організації та дієвого управління маркетингом;
- ✓ формування економічно обґрунтованого бюджету маркетингу, контролю та оцінки маркетингової діяльності, що є платформою для прийняття управлінських рішень (рис. 2).

Пітер Друкер ще у 1955 р. формулює важливість інновацій для економічного успіху компанії наступним чином: «... будь-яке комерційне підприємство має дві – і лише ці дві – основні функції: маркетинг та інновації» [2].

Отже, інновація – це ідея, практика чи об'єкт, які сприймаються як нові для людини. З погляду людської поведінки це не має великого значення, чи є ідея «об'єктивно» новою. Якщо ідея здається людині новою, то це нововведення. Загалом, інновації можна розглядати як синтез потреб ринку із засобами для досягнення та виробництва продукту, що задовольняє потребу.

У 2012 р. головний виконавчий директор Coca-Cola так прокоментував стан економіки та нашого суспільства: «Сьогодні для всіх нас, у бізнесі, уряді та громадянському суспільстві, вибір стоїть між інноваціями та неактуальністю. Ви вводите інновації або втрачаєте актуальність» [2].

Згідно із дослідженням «GfK and Serviceplan», 70 % всіх нещодавно випущених продуктів зникли з ринку лише через 12 місяців. Лише 53 % мають рівень інновацій, достатній для споживачів. Інші вже зазнають невдачі через цей фактор. Це нововведення «важливе та незамінне», на думку 90 % опитаних підприємців. Аналіз ринку згаданих компаній, проведений на основі 265 нещодавно випущених продуктів, показав, що тільки 17 % споживчих товарів, що швидко розповсюджуються, були успішними із самого початку. По-перше, це говорить про те, що

компанії зазнають тиску щодо інновацій, а по-друге, це дає можливість зрозуміти, що менталітету «я теж це роблю (випускаю)» у сьогодиншній конкуренції вже недостатньо. Для успішних маркетингових інновацій необхідно впроваджувати щось посправжньому нове.

Маркетингові інновації потенційно обіцяють компанії більший успіх, ніж технічні (технологічні) інновації. Консалтингова компанія The Boston Consulting Group у своєму дослідженні, проведеному у 2009 році, показує, що маркетингові інновації протягом 5 років у середньому на 5 % прибутковіші, ніж інновації процесів або продуктів. Крім того, за даними BCG, 14 із 25 найбільш інноваційних компаній у всьому світі виробляють переважно маркетингові інновації. Виходячи із цих даних, ми переконані в тому, що у майбутньому конкуренція відбуватиметься не між процесами та продуктами, а між інноваціями у маркетингу.

Отже, маркетингові інновації – це розробка нових методів маркетингу з покращенням дизайну продукту, його пакування, просування продукту та розрахунку цін.

Інноваційна маркетингова концепція полягає у проведенні маркетингових досліджень потреб, поведінки та тенденцій клієнтів, розробці прототипу або змін у дизайні продукту, запуску нового продукту в унікальному місці, унікальному визначенні ціни, просуванні продуктів нетрадиційним способом, і т.д.

Oslo Handbook виділяє такі види маркетингових інновацій, (рис. 3):

- ✓ зміни у проекті або дизайні продукту – вони полягають у зміні форми та зовнішнього вигляду продуктів, що не призводить до зміни їх функціональних та практичних характеристик. Це стосується в основному продуктів харчування, напоїв та засобів для чищення, де упаковка є основним фактором, що визначає зовнішній вигляд продукту. Прикладом ринкових інновацій в області упаковки є використання нової пляшки лосьйону для тіла, яка повинна надати йому індивідуальності та візуальної привабливості;

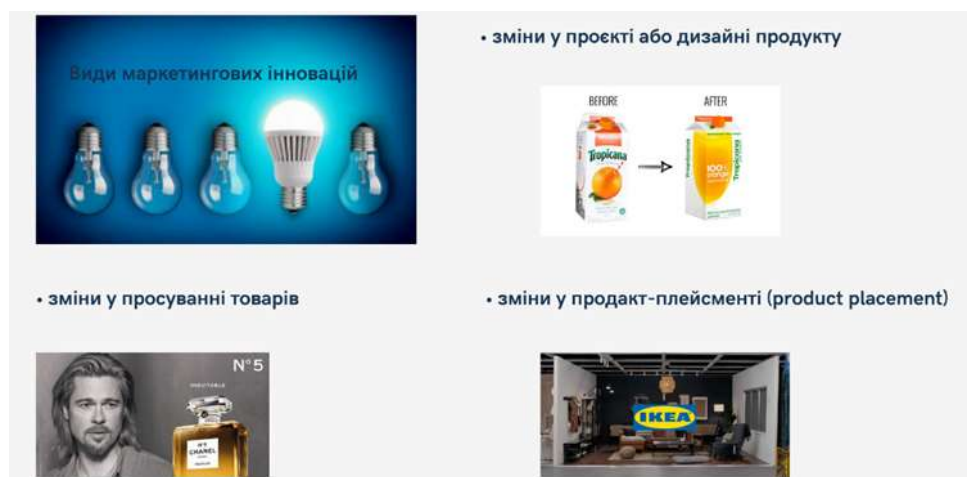


Рис. 3. Види маркетингових інновацій

✓ зміни у продакт-плейсменті (product placement) – вони полягають переважно у впровадженні нових каналів продажів. Канали продажів тут означають методи, що застосовуються для продажу товарів та послуг клієнтам, але не методи логістики (транспортування, зберігання, перевалка товарів), оскільки останні пов'язані з підвищенням ефективності. Прикладами маркетингових інновацій з погляду розподілу продуктів є реалізація франчайзингової системи вперше, прямі продажі або ексклюзивні роздрібні продажі та запровадження ліцензування продукту. Прикладом може бути робота меблевого магазину, де тематично змінено оформлення. Це дозволяє клієнтам побачити продукцію у повноті мебльованих виставкових інтер'єрах;

✓ зміни у просуванні товарів – вони полягають у використанні нових концепцій просування товарів та послуг компанії. Як приклад можна назвати розміщення продукту у фільмах або на телебаченні чи представлення відомої людини у ролі користувача продукту (схвалення продукту знаменитостями). Інший приклад – брендинг – створення та впровадження абсолютно нового символу бренду для позиціонування нового продукту компанії на новому ринку або створення нового іміджу продукту [5].

Маркетингові інновації – це не звичайні (стандартні, періодичні) покращення, рутинні переробки товарів за бажанням клієнтів та регулярні сезонні зміни. Щоб зміни перетворилися на маркетингові інновації, вони мають бути значними та мати регулярний характер.

Для ефективної реалізації інноваційної маркетингової політики підприємствам необхідно впроваджувати маркетингову стратегію, що являє собою комплексний план, розроблений спеціально для досягнення маркетингових цілей організації. Маркетингова стратегія допомагає організації сконцентрувати свої ресурси на найкращих можливостях, щоб збільшити продажі. Ключовим елементом маркетингової стратегії є маркетингове дослідження, що являє собою вивчення ринку на замовлення виробника, який прагне забезпечити кращі умови продажу власного товару за якомога повнішого задоволення потреб споживачів. За результатами такого дослідження приймаються рішення про доцільність або недоцільність збільшення обсягів виробництва та продажів, покращення якості, зміни асортименту, цін, каналів збуту продукції тощо.

Одним із видів маркетингових інновацій є зміни у проєкті або дизайні продукту, тобто зміни форми та зовнішнього вигляду продукту, що не впливають на його функціональні чи практичні характеристики. Не викликає сумніви той факт, що успішний продукт чи послуга повинні мати привабливий дизайн упаковки. Дизайн продукту – це те, як продавці представляють покупцям особливості та переваги продукту. Хороший товарний дизайн має такі спільні риси:

– Корисність: дизайн продукту повинен забезпечувати корисність продукту відповідно до очіку-

вань клієнтів та забезпечувати стабільну продуктивність протягом усього терміну служби продукту.

– Естетика: естетика продукту важлива складова успіху продукту. Зовнішній вигляд продукту залежить від ринку та кінцевого споживача.

– Можливість виробництва: дизайн продукту має забезпечувати ефективне виробництво продукту за допомогою доступних методів виробництва.

– Прибутковість: дизайн товару повинен мати економічний сенс, оскільки він повинен приносити користь споживачеві та забезпечувати стійкість організації.

– Відрізнятися: гарний дизайн продукту повинен дозволяти продукту виділятися серед конкурентів. Цього можна досягти за рахунок привабливого пакування, а також за рахунок надання додаткових послуг по роботі із продуктом.

Наступним основним інноваційним маркетинговим інструментом є упаковка продукту. Пакування використовувалося як інструмент масового маркетингу, і поступово упаковка стала маркетинговим інструментом поряд із рекламою та брендингом. Важливість дизайну упаковки зростає, як і інтерес до її зовнішнього вигляду. Було виявлено значення психологічних факторів, що впливають на візуальні елементи пакування: колір, форма, зображення та графіка. Фахівці стверджують, що на упаковку часто витрачається більше часу та зусиль, ніж на фактичний продукт. Важливість упаковки стрімко зростає, і Ф. Котлер (1997 р.) навіть припустив, що це має бути частиною комплексу маркетингу як «п'ятий Р», разом із товаром, ціною, місцем та просуванням. Упаковку можна назвати «мовчазний продавець» компанії, оскільки вона сприяє рекламі продукту. Для промислових товарів повсякденного попиту приділяється велика увага рекламі та упаковці, тоді як галузі високих технологій концентруються на функціональних аспектах продукту. У межах цієї статті було вирішено зосередитися на характеристиках значення упаковки для продуктів повсякденного попиту, оскільки саме для цієї категорії продуктів просування та упаковка мають велике значення. На рис. 4 представлено, у чому полягає важливість упаковки продукту для інноваційної маркетингової політики підприємства.

Після того, як було обрано остаточний дизайн, необхідно провести останню оцінку (для цього можна використати фокус-групу). Необхідно задати наступні питання, щоб переконатися, що упаковка найкраще представляє продукт і бренд:

– Зрозуміло, що це за товар?

– Упаковка чесно відображає те, що є всередині?

– Як буде виглядати дизайн на полиці з іншими товарами?

– Чи це приваблює цільового клієнта?

– Чи відрізняється упаковка від конкурентів?

– Чи універсальний дизайн? Чи буде він адаптований, якщо прийматися рішення про розширення продуктової лінійки?



Рис. 4. Важливість упаковки продукту для інноваційної маркетингової політики підприємства

Отже, добре продумана та приваблива упаковка продукту – гарна відмінність. Третина споживачів приймає рішення про покупку лише на основі упаковки. Тому упаковка повинна виділятися і виглядати інакше (і краще!), ніж у конкурентів.

Просування товару – сукупність різноманітних заходів, зусиль, дій, що вживаються маркетингове, продавцями товару, посередниками з метою підвищення попиту та збільшення збуту товару. На теперішній час існує велика кількість способів привернення уваги до товарів на споживчому ринку. Так, просування товару передбачає промоушн-акції, маркетингові дослідження та широкі рекламні кампанії. Повноцінне просування товару досягається за допомогою реклами, продавців, назв магазинів, оформлення вітрин, упаковки, розсилки літератури, роздачі безкоштовних зразків, купонів, прес-релізів та інших видів комунікації та просування.

На вибір споживачів часто впливає ціна продукту. Пропозиція надання знижки на продукт може спонукати клієнтів спробувати продукт, коли вони знають, що отримують знижку. Просування продукту через конкурс – наступний ефективний шлях просування продукту. Можна подарувати товар або запропонувати інший приз, пов'язаний із брендом. У будь-якому випадку маркетинговій службі варто зробити конкурс чітко пов'язаним із продуктом через соціальні мережі, електронний маркетинг або прямі поштові розсилки. Багато компаній, які воліють використовувати соціальні мережі для конкурсу, вимагають, щоб учасники підписувалися на сторінку продукту, робили репост та відзначали інших користувачів, щоб залучити нових споживачів.

Підтвердження або позитивні відгуки авторитетних осіб можуть мати великий вплив на просування бренду серед споживачів. Це особливо корисно для невеликих компаній. Використання впливової особи як представника бренду автоматично розширює цільову аудиторію. Доцільно визначити впливову особу та звернутися до неї за оглядом продукту або його схваленням. Цій особі потрібно буде запропонувати будь-яку форму оплати: або у вигляді безкоштовного товару, або у грошовій формі.

Винагорода постійних клієнтів – ще один спосіб зацікавити споживачів випуском продукту. Вар-

то запропонувати стимули для лояльних клієнтів. Для цього можна використовувати список контактів клієнтів, щоб ділитися ексклюзивними оновленнями про нові пропозиції та пропонувати знижки клієнтам, яким подобається бренд.

Ще один спосіб просування продукту – надання клієнтам безкоштовних зразків продукту. Можна робити це на виставках або звернутися до певної аудиторії. Залежно від типу продукту, необхідно вирішити, скільки предметів планується роздати. Якщо товар занадто великий чи дорогий, щоб просто роздати його споживачам, маркетинговій службі слід подумати про використання рекламних продуктів із логотипом товару.

Необхідно зауважити, що для успішного просування продукту, компанії часто використовують кілька різних способів. Доступ до різних ресурсів під час продажу товару може допомогти охопити різні групи споживачів та розширити аудиторію продажів. Також дуже важливо знати цільову аудиторію: перш ніж створювати рекламну кампанію, важливо провести дослідження, щоб визначити ключові демографічні характеристики потенційних клієнтів. Це може допомогти вирішити, як просувати продукт. Наприклад, якщо продукт більш привабливий для молодшої аудиторії, можна просувати його через соціальні канали та впливових осіб замість прямих поштових розсилок.

Просування продукту через платформи соціальних мереж може привернути широку увагу до нього. За останні кілька років соціальні мережі перетворилися на ефективний маркетинговий канал для просування брендів. У середньому 50 % населення взаємодіє мінімум із однією соціальною мережею щодня. Ці люди також проводять у соціальних мережах у середньому дві години на день, при цьому багато хто перевіряє свої соціальні мережі по кілька разів на день. Крім великої аудиторії у соціальних мережах, це дуже рентабельна форма маркетингу з відмінними можливостями пошуку необхідних продуктів (послуг). Це ідеальна платформа для взаємодії зі споживачами та побудови відносин у розважальній та творчій манері. Використання соціальних мереж для бізнесу має низку переваг (рис. 5).



Рис. 5. Переваги використання соціальних мереж для просування продукції та послуг

Маркетинг у соціальних мережах може бути успішним із мінімальними вкладеннями. Рекламу у соціальних мережах є дуже рентабельною і забезпечує один із найвищих показників рентабельності інвестицій серед усіх рекламних методів. Рекламу у соціальних мережах підвищує якість обслуговування клієнтів та їх задоволеність. Загальновідомо, що утримувати клієнтів набагато простіше, ніж заводити нових. Використання соціальних мереж допомагає утримувати клієнтів за рахунок підвищення їх задоволеності та лояльності. Забезпечення легкого доступу до інформації та відповіді на запитання також значно спрощує залучення нових клієнтів. Багато людей хочуть мати можливість ставити питання та вирішувати проблеми, пов'язані з продуктами та послугами, у соціальних мережах. Більшість споживачів очікують, що матимуть змогу отримати допомогу через соціальні мережі.

Реклама у соціальних мережах дозволяє підтримувати лояльність до бренду. Понад 50 % передплатників у соціальних мережах, ймовірно, будуть лояльні до бренду, на який вони підписані. Із більшою ймовірністю вони віддадуть перевагу саме цим продуктам або послугам замість пропозицій конкурентів. Соціальні мережі дозволяють продавцям здаватися більш людяними, взаємодіяти із клієнтами та будувати реальні бізнес-відносини. Це змушує клієнтів почуватися більш пов'язаними з брендом. Якщо клієнти часто спілкуються з продавцями у соціальних мережах і мають з ними добрі стосунки, вони, швидше за все, насамперед подумують про той бренд, на який вони підписані, коли їм знадобиться певний продукт чи послуга.

Якщо у продавців немає облікових записів у соціальних мережах або підтримка клієнтів не пропонується через соціальні мережі, клієнти можуть бути розчаровані. Вони залишаться незадоволеними, тому що не зможуть вирішити проблеми чи знайти потрібну інформацію.

Службі маркетингу варто здійснити оптимальний вибір соціальних мереж для просування своєї продукції (послуг). Слід розглянути низку соціаль-

них мереж. Однак необов'язково бути присутнім на кожній платформі. Необхідно обирати мережі, які часто використовуються цільовою аудиторією та добре відповідають бренду та пропозиціям, які просуває фірма. Найбільш ефективним буде просування продукту у таких соціальних мережах, як: Facebook, Instagram, Twitter, LinkedIn, Pinterest.

Одне із найважливіших маркетингових рішень, які потрібно прийняти, – це ціноутворення. Якщо ціна буде завищена, це може відштовхнути покупців. Якщо вона занадто низька, то це може викликати сумніви щодо якості продукції.

Слід зазначити, що на теперішній час дуже багато маркетингових служб впроваджують інновації у свої стратегії ціноутворення. Стратегія ціноутворення – це всеосяжний термін, що відноситься до процесів та методологій, які використовують продавці, щоб визначити, за яку ціну продавати свої товари та послуги. Це також важливий фактор, який безпосередньо вплине на обсяг продажів та розвиток бізнесу.

Існує практичне правило: клієнти завжди віддають перевагу низьким цінам, але низькі ціни можуть завдати шкоди бізнесу, якщо вони не можуть покрити витрати. Отже, якщо ціна продукту є надто високою, обсяг продажу зменшиться, оскільки менше покупців готові платити за нього. Однак, якщо ціна буде надто низькою, продавці втратять основну ідею ведення бізнесу, а саме – отримання максимального прибутку. Тому вибір правильної цінової стратегії – це вершина стратегії розвитку підприємства.

Використання ціни як стратегічного інструменту може збільшити як прибуток, так і задоволеність клієнтів. Разом із тим цінові стратегії для нових товарів та товарів, які існують на ринку вже тривалий час, будуть значно відрізнятися. Визначення ціни нового продукту – важливий етап, що впливає на успіх продукту на ринку. Від початкової ціни товару залежить рівень прибутку з продажу, перше сприйняття товару цільовою аудиторією, можливості збільшення прибутку у довгостроковому періоді, і на-

віль загальна конкурентоспроможність товару. Якщо початкова ціна буде встановлена неправильно, навіть хороший товар може зазнати невдачі.

Існує дві протилежні цінові стратегії (підходи) до встановлення ціни на новий продукт: цінова політика «зняття вершків» і «проникнення на ринок» (рис. 6).

Будь-якій фірмі слід розглядати не лише традиційні, але й інноваційні стратегії ціноутворення (рис. 7).

Ефективні стратегії та тактика ціноутворення можуть підвищити рентабельність продажів на 2 – 7 %. Однією із інноваційних стратегій ціноутворення слід вважати преміум-ціноутворення. Преміальне ціноутворення – приклад розумної стратегії ціноутворення, у якій продавці встановлюють високу ціну протягом усього життєвого циклу продукту. У продавців складається враження, що їхні продукти вищої якості, ніж у конкурентів, з деякими передовими функціями. Ця стратегія ціноутворення працює лише тоді, коли цільові клієнти відносяться до вищого класу, якого цікавить якість продукту, а не ціна. Зокрема, стратегію преміум-ціноутворення можна застосовувати, якщо продукти є предметами розкоші, унікальними продуктами, або на ранньому етапі їх впровадження, якщо є авторські права на цю про-

дукцію, або на ринку існують сильні бар'єри для входу.

Наступна інноваційна стратегія – це динамічне ціноутворення – спосіб встановлення різних цін на той самий товар. Залежно від змін попиту та пропозиції, ринкових умов чи сезонів продавці можуть гнучко змінювати ціни, щоб максимізувати свій прибуток.

Пакетне ціноутворення також є одним із прикладів інноваційної стратегії ціноутворення. Це метод ціноутворення, у якому продавці об'єднують безліч окремих продуктів у комплексну пакетну угоду та продають їх за зниженою ціною «все включено» замість того, щоб продавати їх окремо.

Існує ще один ефективний інноваційний спосіб, який дозволяє виставити ціну так, щоб підвищити продажі та отримати більше прибутку, не докладаючи до цього багато зусиль. Це – психологічне ціноутворення. Психологічне ціноутворення є прикладом психолого-маркетингової стратегії, заснованої на теорії про те, що деякі ціни сильніше за інші впливають на покупця. Існує принаймні 5 стратегій психологічного ціноутворення, а саме:

- приваблива ціна;
- стратегія престижу;
- плати за одне, отримай друге безкоштовно;



Рис. 6. Цінові стратегії для нових товарів та послуг

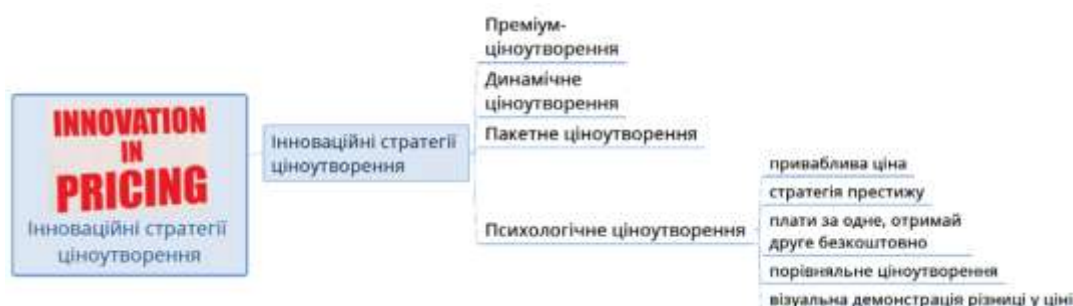


Рис. 7. Інноваційні стратегії ціноутворення

– порівняльне ціноутворення;
візуальна демонстрація різниці у ціні.

«Приваблива ціна»: слід зменшити цифру зліва на 1. Ця стратегія полягає в тому, щоб призначати ціну, яка закінчується на 9 або на 99. Покупці дуже часто стикаються із таким ціноутворенням, але не звертають на нього уваги. Побачивши ціни в 300 і 299 грн., мозок вважає їх різними. Для нього 299 – це швидше 200, ніж 300, що суттєво дешевше.

У 2005 році Thomas and Morwitz провели дослідження під назвою «Ефект лівої цифри у розумінні цін». Вони з'ясували, що ціна, яка закінчується на 9, працює тільки в тому випадку, якщо при цьому змінюється і цифра в числі. Тобто, наприклад, ефект від зниження на 1 у випадку з 360 і 359 грн. не буде.

В експерименті, проведеному університетом Чикаго, досліджували ціни на жіночий одяг. Речі були виставлені за \$34, \$39 та \$44. На превеликий подив дослідників, найчастіше купували одяг за \$39, незважаючи на те, що були ціни і нижчі. Таким чином, якщо виробник хоче збільшити продажі свого товару або послуги, необхідно перетворювати нулі на закінченнях цін на дев'ятки. Відмінний приклад такої стратегії – сайт Apple, де ціна кожного продукту закінчується на 9. До речі, ефект можна посилити, якщо закінчення числа написати дрібнішим шрифтом.

Престижне ціноутворення – повна протилежність попередньої стратегії. Воно передбачає заокруглення цін у більшу сторону, наприклад, \$99,99 у \$100. У ході дослідження, проведеного у 2015 році, було з'ясовано, що заокруглені цифри простіше рахувати, що стимулює споживчі бажання покупця. Неокруглені числа рахувати складніше, і це гальмує бажання відразу купити ще щось.

Суть стратегії «Плати за одне, отримай друге безкоштовно» полягає у тому, що клієнт оплачує повну вартість одного товару або послуги та отримує іншу у подарунок. Цей прийом отримав свого часу широке поширення, тому сьогодні він вже далеко не так ефективно працює. Але його можна використувати в дещо зміненому вигляді, наприклад:

Купуйте річ та отримайте 25 % знижку на наступну покупку.

Купуйте річ та отримайте чотири бонуси.

Купуйте одну річ та отримайте три безкоштовно.

Щоб отримати від цієї стратегії максимум, продавцю слід творчо підійти до своїх знижкових пропозицій.

Порівняльне ціноутворення – найефективніша психологічна стратегія. Слід просто запропонувати два аналогічні товари одночасно, але за різною ціною. Для покупця це психологічна гра вибору. Ця стратегія добре працює з модними брендами, коли, наприклад, поруч вішають два смокінги однакової якості, але за різними цінами. Покупець обере той, що дорожче. Адже зазвичай у свідомості людини те, що дорожче, якісніше.

Виходячи із викладеного, слід зазначити, що ціноутворення не є статичним фактором, а це означає, що необхідно налаштовувати його відповідно до вимог ринку, які постійно змінюються.

Висновки. Для підвищення ефективності своєї діяльності підприємствам слід впроваджувати інноваційний маркетинг. Маркетингові інновації – це запровадження нового методу маркетингу, що передбачає значні зміни у дизайні чи упаковці продукту, розміщенні продукту, просуванні продукту чи ціноутворенні.

Для ефективної реалізації інноваційної маркетингової політики підприємствам необхідно впроваджувати маркетингову стратегію та проводити маркетингові дослідження із застосування новітніх методичних прийомів: опитування, спостереження, методу експертних оцінок та фокус-груп.

Важливим шляхом удосконалення інноваційної маркетингової політики підприємства є оптимізація витрат на маркетинг та рекламу. Для реалізації цієї мети необхідно запровадити систему оперативного отримання інформації про ефективність як окремих маркетингових заходів, так і маркетингової діяльності загалом. Основними етапами оцінки роботи маркетингологів при впровадженні інноваційної маркетингової політики підприємства є: постановка завдань, оцінка результатів та підготовка програми коригувальних заходів, що допоможуть виключити виявлені негативні сторони роботи маркетингової служби.

Отже, вітчизняним підприємствам вдасться реалізувати свої конкурентні переваги лише у разі використання ефективної маркетингової політики, заснованої на застосуванні сучасних принципів інноваційного маркетингу.

Література

1. Кардаш В.Я. Маркетингова товарна політика. Київ: КНЕУ, 2000. 124 с.
2. Marketinginnovation. Status Quo & Ausblick, Driver und Barrieren. URI: <https://www.grin.com/document/275831>
3. Рекламное мышление. URI: <https://www.marketing.spb.ru/lib-comm/reklmind.htm>
4. Балабанова Л.В. Маркетинг торговельного підприємства: Навч. посіб. / Л.В. Балабанова. Донецьк: ДонНУЕТ, 2008. 620 с.
5. Marketing innovation URI: https://ceopedia.org/index.php/Marketing_innovation
6. Why Product Packaging Is Important To Your Marketing Strategy. URI: <https://brandhause.com/why-product-packaging-is-important/>

References

1. Kardash V.Ja. Marketyngova tovarna polityka. Kyi'v: KNEU, 2000. 124 s.
2. Marketinginnovation. Status Quo & Ausblick, Driver und Barrieren. URI: <https://www.grin.com/document/275831>
3. Reklamnoe mishlenye.. URI: <https://www.marketing.spb.ru/lib-comm/reklmind.htm>

4. Balabanova L.V. *Marketingyng torgovel'nogo pidpryjemstva: Navch. posib.* / L.V. Balabanova. Donec'k: DonNUET, 2008. 620 s.
5. Marketing innovationURI: https://ceopedia.org/index.php/Marketing_innovation
6. Why Product Packaging Is Important To Your Marketing Strategy. URI:<https://brandhause.com/why-product-packaging-is-important/>

Havriushenko H.V. Formation and implementation of the innovative marketing policy of the enterprise

The article focuses on the fact that marketing in its essential content is a theoretical concept that contributes to the adaptation of production entities to work in a market economy. Marketing is the activity of companies and organizations in the interests of their consumers. Marketing involves meeting the needs of the client with the benefit of the enterprise (firm). It is emphasized that the phased formation of a marketing policy involves: the implementation of analytical diagnostics of the enterprise and strategic foresight (forecasting) of its development; development of a marketing mix; ensuring effective organization and effective management of marketing; formation of an economically justified budget for marketing, control and evaluation of marketing activities, which is a platform for making managerial decisions. It is shown that in order to improve the efficiency the enterprises should introduce innovative marketing. Marketing innovation is the introduction of a new way of marketing that involves significant changes in product design or packaging, product placement, product promotion, or pricing. It is emphasized that in order to effectively implement an innovative marketing policy the enterprises need to implement a marketing strategy and conduct marketing research on the use of the latest methodological techniques: survey, observation, expert assessments and focus groups. It is noted that the basis of the innovative marketing policy of any enterprise is the pricing strategy. Choosing the right pricing strategy is the pinnacle of an enterprise's

development strategy. It is noted that there are two opposite pricing strategies for setting the price of a new product: the pricing policy of "skimming the cream": setting a deliberately high price for a new product, which is necessary to obtain excess profits, which in a short time pays off the investments spent on development, production and withdrawal product to the market, and the pricing strategy of "market penetration", which consists in setting a deliberately low price for a new product. It is marked that along with the general (traditional) pricing strategies for a new product and for a product that has been on the market for a long time, firms should consider innovative pricing strategies, namely: premium pricing, in which sellers set a high price throughout the entire life cycle product. Attention is focused on the fact that an important way to improve the innovative marketing policy of an enterprise is to optimize the costs of marketing and advertising. To achieve this goal, it is necessary to introduce a system for quickly obtaining information about the effectiveness of both individual marketing activities and marketing activities as a whole. The main stages of evaluating the work of marketers in the implementation of an innovative marketing policy of an enterprise: setting goals, evaluating the results and preparing a program of corrective measures that will help eliminate the identified negative aspects of the work of the marketing service.

Keywords: local budgets, united territorial community, financial decentralization, local budget revenues, taxes of local budgets.

Гаврюшенко Ганна Володимирівна – к.е.н., доц., доцент кафедри географії, Луганський національний університет імені Тараса Шевченка (м. Старобільськ) superanna@ukr.net

Стаття подана 30.01.2022 р.

